

IX Всероссийский семинар по химическим и электроразрядным СО-лазерам (ХЛ/СОЛ'99, Смолячково)

В.И.Машенджинов, М.А.Ротинян

Дан обзор работ, доложенных на IX семинаре, проходившем 26–29 октября на базе Российского научного центра «Прикладная химия» (пос. Смолячково Ленингр. обл.).

В течение почти 20 лет в РНЦ «Прикладная химия» (ПХ) каждые два года проводится семинар, посвященный, в основном, проблемам создания мощных химических лазеров. С 1995 г. по инициативе президента Лазерной ассоциации И.Б.Ковша в тематику семинара включены доклады, связанные с разработкой мощных технологических электроразрядных СО-лазеров. В работе IX семинара приняли участие 60 человек. Было проведено 4 заседания и сделано 22 доклада.

Семинар открыл М.А.Ротинян, который рассказал о 30-летней истории становления лазерной тематики в РНЦ ПХ и представил хорошо иллюстрированную хронику смолячковских семинаров.

Несколько сообщений было посвящено применению химических лазеров. В.И.Баринов (ГУП ВИМИ, Москва) сделал подробный обзор всех упоминавшихся в литературе областей применения химических лазеров (ХЛ), уделив особое внимание их гражданскому использованию. Большой коэффициент поглощения в воде в области длин волн 3 мкм, наличие волоконных световодов делают HF-лазер перспективным для медицины – офтальмологии, ангиопластики, косметологии. DF-ХЛ применялся в лидарах экологического контроля атмосферы и обнаружения утечек природного газа на магистральных трубопроводах, HF-ХЛ предлагался для мониторинга воздушной среды электрохимических алюминиевых производств. В работах японских исследователей кислородно-иодный ХЛ (КИХЛ) рассматривается как конкурент традиционных технологических лазеров. Высокое оптическое качество среды КИХЛ, наличие волоконной оптики с необходимой лучевой прочностью и меньший коэффициент отражения поверхностью обрабатываемых материалов по сравнению с СО₂-лазерами дают КИХЛ значительные преимущества, в особенности тогда, когда требуется высокая средняя мощность (более 10 кВт) и автономный режим работы лазера.

В дополнение к этому докладу Г.К.Васильев (Институт химической физики, Черноголовка Моск. обл. – ИХФЧ) рассказал о работе, доложенной на XXI Международной конференции по лазерам LASERS'98 (7–11 декабря 1998, Тусон, Аризона, США), где была предложена технология бурения горных пород излучением DF-ХЛ.

РНЦ «Прикладная химия», Россия, 197198 С.-Петербург, просп. Добролюбова, 14; тел.: (812) 238-94-48; факс: (812) 238-92-51

Поступила в редакцию 17 февраля 2000 г.

В докладе Е.Ф.Соботковской (РНЦ ПХ) по материалам открытых публикаций рассмотрены некоторые тенденции разработок непрерывных химических лазеров (НХЛ) для военных целей. Дан краткий анализ этапов развития мощных НХЛ за рубежом, а также комментариев к рекламным материалам фирмы TRW (США), которая является ведущей в мире в данной области. Приведены сведения о современном состоянии дел в выполнении программ по созданию лазеров космического, воздушного и наземного базирования.

В.Г.Карельский (НПО «Энергомаш», Химки Моск. обл.) рассмотрел возможные области применения бортовой лазерной технологической установки (БЛТУ) космического базирования на основе НХЛ с мощностью в пучке до 30 кВт, в том числе космические технологии обработки и выращивания материалов, энергоснабжение космических аппаратов путем передачи лучевой энергии, мониторинг атмосферы, борьба с космическим мусором и др. Отмечено, что несмотря на большой расход рабочего вещества, преимущество НХЛ в этом отношении состоит еще и в том, что в его выхлопном тракте может быть размещен турбоэлектрогенератор, который, по оценке Исследовательского центра им. М.В.Келдыша (Москва), при работе НХЛ будет производить до 50 кВт электроэнергии. Предварительная компоновка БЛТУ показала возможность ее размещения на космических аппаратах типа «Прогресс» и «Ресурс».

В докладе Б.Г.Бравого (ИХФЧ) рассмотрены особенности применения лидара на основе импульсного HF(DF)-ХЛ с энергией в импульсе до 100 Дж для дистанционного анализа токсичных аэрозольных образований. Действие лидара основано на принципе обратного аэрозольного рассеяния, и только HF(DF)-ХЛ с такой высокой энергией и широким спектральным диапазоном позволяет решить эту задачу для широкого круга токсичных веществ и на расстояниях обнаружения до 10 км. На примере трибутиламина, который является спектральным аналогом современных отравляющих веществ, показано, что область аномальной дисперсии зависит от размера капель (чем они меньше, тем область уже); приведены минимальные обнаруживаемые концентрации (МОК). Так, для газовой примеси с сечением поглощения 10^{-17} см² объемная МОК составляет $4 \cdot 10^{-9}$, а для сечения 10^{-21} см² – $4 \cdot 10^{-5}$; для аэрозоля МОК равна примерно 2 мг/м³.

Тематика НХЛ объединяла 7 докладов. С.И.Жданович (РНЦ ПХ) привел некоторые экспериментальные

данные, которые подтверждают возможность химической подкачки в газодинамическом лазере на продуктах сгорания экзотического топлива – смеси дицианацетилена, закиси азота и азота. Дополнительное впрыскивание N_2O в околоскритическую область сопла вызывает рост коэффициента усиления малого сигнала в 1.5 раза. При этом он достигает 1.9 м^{-1} , тогда как его расчет без учета реакций $N_2O \rightarrow N_2 + O$ и $CO + O \rightarrow CO_2$ дает только 1.2 м^{-1} . Однако окончательный вывод о наличии химической подкачки можно будет сделать после дополнительных экспериментов и расчетного анализа по более детальной кинетической модели.

Расчетная оптимизация характеристик DF-НХЛ была представлена в докладе К.К.Некрасова (НПО «Энергомаш»). Рассматривалась триада – генератор активной среды, диффузор и эжектор – и сравнивались удельные мощности генерации (в расчете на суммарный расход генератора и эжектора) для двух давлений в активной среде: 4 и 10 Тор. Исходные данные для расчета (удельный энергопотребление и давление на входе диффузора) брались из ранее выполненной работы М.Л.Шура (РНЦ ПХ). Близость сравниваемых удельных мощностей позволяет сделать вывод о том, что по крайней мере для DF-лазера нужно стремиться к низким давлениям в резонаторе, обеспечивающим высокий удельный энергопотребление и меньший расход дорогостоящего дейтерия.

В докладе В.К.Рэбоне (РНЦ ПХ) дан обзор всех экспериментальных работ по исследованию HF-НХЛ с сопловыми блоками радиального расширения. Было испытано 7 вариантов устройств с расходом рабочего тела в диапазоне 27–700 г/с (модель максимального масштаба имела удельный энергопотребление ~ 260 Дж/г). На основе результатов, полученных при конструктивном совершенствовании малых моделей и оптимизации химического состава их рабочего тела, оценены перспективы повышения удельного энергопотребления этой модели. Показано, что удельный энергопотребление может достигнуть 560 Дж/г.

Результаты исследования HF-НХЛ с трехструйными сопловыми блоками обобщены в сообщении С.В.Конкина (РНЦ ПХ). Такие сопловые блоки (в которых струи окислителя и горючего разделены гелием) по сравнению с их двухструйными аналогами позволяют увеличить удельный энергопотребление, протяженность активной среды по потоку (до 15 см) и снизить оптическую неоднородность среды. Приведены данные по влиянию на удельный энергопотребление и длину зоны генерации угла впрыска вторичного горючего и давления в активной среде.

Обзор экспериментальных и теоретических работ по исследованию обертонового HF-НХЛ, выполненных в РНЦ ПХ совместно с НПО «Энергомаш» и ВЦ ГОИ, представил И.А.Федоров (РНЦ ПХ). Приведены данные по влиянию на параметры лазера газодинамических характеристик потока рабочей смеси и особенностей оптического резонатора. Для лазера с длиной активной среды 70 см определена максимальная выходная мощность при изменении массового расхода компонентов, коэффициента избытка окислителя, степени разбавления рабочей смеси гелием и положения оптической оси резонатора относительно среза соплового блока.

В лазерных экспериментах удалось также исследовать параметры применяемых дирижабельных зеркал резонатора. Определены коэффициент поверхностного рассеяния (~ 0.001) и лучевая стойкость (37 кВт/см^2) при длительности нагрузки 10 с. Приведены максимальные

достигнутые мощность генерации в обертоновой области (7.8 кВт) и эффективность (43 %), определенная относительно мощности на основном тоне в тех же условиях.

Сверхзвуковые HF-НХЛ, в которых донором атома фтора являлась молекула SF_6 , подробно исследовались многими авторами. Во всех случаях пиролиз SF_6 осуществлялся в плазмотроне при температуре $\sim 2000\text{ К}$. В своем сообщении В.Э.Ревич (РНЦ ПХ) привел результаты термодинамических расчетов смеси $SF_6 - O_2$ и показал, что при разложении SF_6 в воздухе для обеспечения необходимой степени диссоциации не требуется столь высокая температура, а достаточно $\sim 1700\text{ К}$. Это позволяет рассмотреть возможность создания автономного НХЛ с использованием нетоксичных компонентов на основе, например, газотурбинного источника горячего воздуха, каупера или других подобных устройств. Проведен расчет расходных характеристик такого лазера для получения мощности 300 кВт.

Б.А.Васкубенко (РФЯЦ ВНИИЭФ, Саров) обсудил проблемы восстановления давления в сверхзвуковом кислородно-иодном лазере (КИЛ). Он отметил, что уже существующие струйные генераторы $O_2(^1\Delta)$ позволяют иметь суммарное статическое давление на входе сопловой решетки до 100 Тор, а применение разработанного во ВНИИЭФ генератора шнекового типа обещает еще более радужные перспективы. Этот генератор позволяет более чем в два раза по сравнению со струйным поднять расход мощности (до 1700 Вт/см^2) при степени утилизации Cl_2 более 90 %, а также обеспечить давление $O_2(^1\Delta)$ более 70 Тор на входе в сопло, что в три раза превышает достигнутое в настоящее время.

Импульсным ХЛ было посвящено шесть докладов. С.Д.Великанов (РФЯЦ ВНИИЭФ) изложил разработанную во ВНИИЭФ концепцию построения частотных цепных ХЛ с большой энергией в импульсе. Эта концепция включает модульный принцип построения с идентичными модулями, работу по схеме генератор – усилитель, замкнутый цикл по рабочей среде, использование $H_2 (D_2)$ как доноров $H (D)$, применение лезвийных электродов без дополнительных устройств предъютизации, питание электродов от разнополярных ГИНов. В докладе приведены результаты исследования системы, в которую входят три идентичных модуля. Энергия генерации на DF с единичного модуля составляла ~ 10 Дж при КПД 2–2.5 %. Продемонстрирована работа с частотой 10 Гц; задающий генератор с неустойчивым резонатором давал дифракционную расходимость.

Расчетное исследование системы из многих модулей, разработанных С.Д.Великановым для получения суммарной энергии 1 кДж, представил Г.М.Мищенко (РФЯЦ ВНИИЭФ). Он показал, что его модель хорошо описывает экспериментальные характеристики модуля и привел расчетные данные по зависимости КПД модуля от вложенной энергии, по влиянию на энергию генерации коэффициента увеличения неустойчивого резонатора, по влиянию на суммарную энергию системы модулей (длина активной среды до 6 м) рассинхронизации их времен запуска и задержки пуска усилителя. Были приведены также результаты детальных исследований влияния мелкомасштабных оптических неоднородностей на качество пучка электроразрядного ХЛ такого типа.

Идея теплоцепочечного инициирования импульсного HF-ХЛ была развита в сообщении В.И.Игошина (филиал ФИАН, Самара). Активные центры в рабочей смеси

такого лазера ($F_2 - H_2 - HF - He$) создаются при распаде соединений с малой энергией активации разложения. В качестве таких соединений предложено рассмотреть F_2O_2 и N_2F_2 . Энергия в систему вводится за счет оптической накачки HF от внешнего источника. Рассчитаны возможные характеристики такого лазера.

В мире накоплен очень небольшой опыт по созданию импульсного-периодических ХЛ на рабочей смеси $F_2 - H_2 (D_2)$, поэтому любая работа в этом направлении вызывает повышенный интерес. В сообщении К.А.Кутумова (РНИЦ ПХ) были изложены приемы, которые позволили реализовать устойчивую работу HF-ХЛ на цепной реакции с активным объемом 50 см^3 и частотой следования импульсов 50 Гц. При инициировании реакции барьерным разрядом (полупроводниковая сегнетокерамика) технический КПД достигал 10 %.

В докладах М.А.Азарова и А.В.Арсеньева (РНИЦ ПХ) дан анализ рабочих процессов, определяющих предельные энергетические характеристики HF/DF-ИХЛ с фотоиницированием. Приведены результаты расчетной оптимизации и экспериментов, проведенных авторами с моделью такого лазера, рабочей объем которого варьировался в диапазоне 50–100 л. Было показано, что

- для достижения предельных энергетических характеристик необходимо обеспечить стократное превышение ненасыщенного коэффициента усиления над порогом;

- путем изменения степени диссоциации фтора и суммарного давления рабочей смеси можно варьировать длительность импульса генерации в диапазоне от долей микросекунды до сотен микросекунд, в эксперименте этот диапазон составлял 1–50 мкс;

- схема построения лазера задающий генератор–усилитель в наилучшей степени решает задачу получения высокого энергосъема и хорошего оптического качества выходного излучения;

- существенное влияние на работу DF-ИХЛ оказывает CO_2 , который содержится в лазерной среде и в воздухе, заполняющем часть объема сложного резонатора лазера.

Экспериментально исследовано как суммарное, так и раздельное влияние поглощения и релаксации на примеси CO_2 на энергетические и спектральные характеристики DF-ИХЛ. Одним из результатов этой работы было определение требований к содержанию CO_2 во фторе. По заключению авторов, при использовании фтора в рабочей смеси DF-ИХЛ оно не должно превышать 0.005 %.

По тематике СО-лазеров было прочитано три доклада. В.Ф.Шарков (ТРИНИТИ, Троицк, Моск. обл.) дал обзор работ, выполненных в ГИПХ (ныне РНИЦ ПХ), его пермском филиале и ФИАЭ (ныне ТРИНИТИ) по исследованию дозвуковых СО-лазеров и созданию экспериментальной базы для их испытаний. Он подчеркнул, что опыт, накопленный в 60-х–70-х гг., был успешно применен при разработке крупномасштабных установок в ТРИНИТИ.

В докладе В.А.Гурашвили (ТРИНИТИ) суммированы основные достижения института по созданию мощных СО-лазеров, в том числе крупномасштабного дозвукового СО-лазера с КПД до 30 %, импульсно-периодического СО-лазера с частотой повторения импульсов 100 Гц, сверхзвукового СО-лазера многокиловаттной мощности, обертонового СО-лазера, излучающего в диапазоне 2.5–4 мкм при КПД (относительно основного тона) 10 %. Исследовалось также ОВФ на самой активной

среде при четырехволновом смешении и интенсивности излучения опорной волны $\sim 1 \text{ кВт/см}^2$.

Кроме того, докладчик обсудил возможные области применения мощных СО-лазеров, например разделение изотопов кислорода при многофотонной диссоциации $COCl_2$. По его мнению, применение технологических лазеров в традиционные области (резка, сварка и др.) экономически оправданно, если с их помощью производительность труда увеличивается не менее, чем в 20 раз.

Результаты расчетного исследования сверхзвукового СО-лазера с периодической модуляцией добротности резонатора представлены в сообщении Б.С.Александрова (РНИЦ ПХ). Автор показал, что такой режим работы СО-лазера позволяет поднять пиковую мощность на 2–3 порядка при длительности импульсов на полувисоте 35–60 нс, расширить спектральный диапазон излучения лазера в длинноволновую область и при частотах повторения импульсов в десятки килогерц сохранить среднюю мощность излучения на уровне 90 % от мощности в непрерывном режиме. СО-лазер с модуляцией добротности перспективен при проведении селективных химических реакций, используемых, например, для разделения изотопов.

Доклад общего характера, в равной мере относящийся ко всем типам мощных лазеров, сделал Н.Э.Саркаров (ТРИНИТИ). На примере экспериментальных исследований мощных непрерывных электроразрядных CO_2 -лазеров он показал, что дифракционные явления и незначительные неоднородности в среде или на оптических элементах вызывают распад пучка излучения лазера с образованием полосатой структуры или «горячих» пятен. Этот эффект наблюдается уже при интенсивности излучения 10 кВт/см^2 , и при масштабировании лазера с целью достижения высоких мощностей путем увеличения размера моноизлучателя вряд ли удастся избежать его проявления. Автор считает, что мощные пучки следует формировать путем когерентного сложения пучков единичных модулей.

К сожалению, в программе IX семинара были отражены не все направления работ, проводимых в России в области химических и СО-лазеров. Так, вопреки традиции, лишь одна работа посвящалась КИЛ и только в одном сообщении обсуждались проблемы оптики мощных лазеров; не были представлены и эксимерные системы. Однако, как и на любой другой конференции, эта ситуация не столько отражает тенденции развития, сколько определяется составом участников. Тем не менее, рассмотрение даже неполной картины позволяет сделать некоторые обобщения.

Если оставить в стороне военные применения НХЛ, идеология которых достаточно полно разработана в США (программы «ABL», «Alpha», «TheI» и др.), то перспективы их мирного использования достаточно туманны. В той же мере это относится и к СО-лазерам. Осуществление программ создания технологических СО-лазеров средней мощности в Японии и Европейском союзе не привело к вытеснению традиционных CO_2 - и твердотельных лазеров из промышленности, хотя использование СО-лазеров обещает меньшие затраты на единицу продукции. Как было отмечено на семинаре, в том случае, когда для технологического процесса существенна длина волны, например при разделении изотопов, можно ожидать, что СО-лазеры окажутся вне конкуренции.

В нашей стране накоплен большой научный и техни-

ческий потенциал по созданию СО-лазеров различного класса и мощностей – дозвуковых, сверхзвуковых, импульсно-периодических (ТРИНИТИ, ФИАН, РНЦ ПХ), и в этой области Россия занимает лидирующее положение. Что касается ХЛ, то их преимущества отчетливо проявляются тогда, когда требуются автономные системы с малым расходом рабочих компонентов, например для задач космической техники.

За более чем 30-летнюю историю исследований HF(DF)-НХЛ основные научные проблемы кинетики и газовой динамики были решены, поэтому ожидать принципиально новых результатов в этой области трудно. Все исследования носят характер конструктивной доработки некоторых элементов или обобщают уже накопленные результаты. Такие принципиальные проблемы, как масштабирование НХЛ на обертоновых переходах, когерентное сложение излучения модулей, ОВФ многолинейчатых излучателей стоят на повестке дня, однако на этом семинаре они не обсуждались.

В области разработки ИХЛ можно отметить существенное продвижение в создании многоджоульных HF(DF)-ХЛ на нецепной реакции. Сейчас уже можно говорить об импульсно-периодическом HF(DF)-ХЛ на смеси $SF_6-H_2(D_2)$ как о техническом устройстве с энергией 100 Дж/имп.

Следует также отметить непрекращающиеся попытки смоделировать химическую систему с фотонным или теплопочечным разветвлением, которая в случае реализации позволит создать идеальный каскадный ХЛ с практически нулевой энергией инициирования. Ценность этой работы столь же велика, сколь велики трудности на пути претворения развиваемых идей в реальную лазерную систему.

V.I.Mashendzhin, M.A.Rotinyan. IX all-Russia seminar on chemical and electric-discharge CO lasers (KhL/COL'99, Smolyachkovo).

A review of reports made at the IX seminar, which took place on the base of the 'Applied Chemistry' Russian Research Centre (Smolyachkovo, Leningradskaya oblast), is presented.

ПОПРАВКИ

И.Я.Артюков, Б.Р.Бенвер, А.В.Виноградов, Ю.С.Касьянов, В.В.Кондратенко, К.Д.Мачетто, А.Озолс, Х.Х.Рокка, Х.Л.А.Чилла. Фокусировка пучка компактного импульсно-периодического рентгеновского лазера для изучения взаимодействия излучения с металлическими мишенями и рентгеновской рефлектометрии («Квантовая электроника», 2000, т.30, № 4, с.328–332).

В написании фамилий авторов статьи допущена опечатка: вместо И.Я.Артюков следует читать И.А.Артюков.

В статье отсутствуют указания мест работы первых пяти авторов:

И.А.Артюков, А.В.Виноградов – Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Россия, 117924 Москва, Ленинский просп., 53

Б.Р.Бенвер – Colorado State University, Fort Collins, CO 80523, USA

Ю.С.Касьянов – Институт общей физики РАН, Россия, 117942 Москва, ул. Вавилова, 38

В.В.Кондратенко – Харьковский политехнический университет, Украина, 310002 Харьков, ул. Фрунзе, 21

Т.Н.Копылова, Г.В.Майер, А.В.Резниченко, А.Н.Солдатов, Г.С.Евтушенко, Л.Г.Самсонова, В.А.Светличный, В.Б.Суханов, М.С.Долотов, Е.П.Пономаренко, Д.В.Шиянов, А.А.Шапошников, Е.Н.Тельминов, Р.Т.Кузнецова. Генерация излучения в УФ и видимой областях спектра при накачке красителей в полимерных матрицах («Квантовая электроника», 2000, т.30, № 5, с.387–392).

В написании фамилий авторов статьи допущена опечатка: вместо М.С.Долотов следует читать С.М.Долотов.

А.М.Нугуманов, Р.В.Смирнов, В.И.Соколов. Методика измерения волнового фронта излучения с использованием трехволнового интерферометра сдвига («Квантовая электроника», 2000, т.30, № 5, с.435–440).

На с.439 в подрисуночной подписи к рис.7 допущена опечатка: вместо «... $R = 61.4$ см...» следует читать «... $R = 614$ см...».

В.Ю.Ананьев, Б.И.Васильев, А.Н.Лобанов, А.П.Лыткин, Чо Чен Вхан, Ким Жэн Сэн. Двухчастотный лидар на основе аммиачного лазера («Квантовая электроника», 2000, т.30, № 6, с.535–539).

В статье допущена опечатка: на с. 536 в левой колонке в 19-й строке сверху вместо «... не менее 10 мс...» следует читать «... менее 10 мс...».