

Применение распределенного золотого катализатора для повышения выходной мощности и КПД отпаянного CO₂-лазера с накачкой поперечным ВЧ разрядом в трубках

Н.А.Генералов, В.П.Зимаков, Н.Г.Соловьев, А.Н.Шемякин, М.Ю.Якимов, Н.А.Яценко

Экспериментально показано, что поперечный ВЧ разряд в трубках проявляет повышенную по сравнению с разрядом постоянного тока плазмохимическую активность, что приводит к снижению характеристик CO₂-лазеров с ВЧ возбуждением. С помощью распределенного катализатора на основе золота, способствующего восстановлению CO₂, удалось существенно повысить выходную мощность и КПД отпаянного лазера. В экспериментальном лазере с ВЧ возбуждением на частоте 27.1 МГц в трубках с распределенным золотым катализатором получена выходная мощность на единицу длины активной среды 0.77 Вт/см при КПД по вложенной энергии 18.5 %.

Ключевые слова: отпаянный CO₂-лазер, ВЧ разряд в трубках, диссоциация CO₂, распределенный золотой катализатор.

1. Введение

Наряду с использованием все более высоких частот ВЧ возбуждения (свыше 100 МГц) для накачки компактных щелевых CO₂-лазеров с диффузионным охлаждением активной среды [1–3], существует и противоположная тенденция [4–6], обусловленная перспективой создания относительно недорогих мощных ВЧ генераторов на полупроводниковых элементах, работающих в диапазоне частот до 40 МГц.

Для получения приемлемого КПД лазерной генерации при сравнительно низких частотах ВЧ возбуждения f необходимо увеличивать межэлектродное расстояние d [3]. В противном случае невыгодные для лазерной генерации приэлектродные слои, толщина которых d_s может быть оценена из выражения $fd_s \approx 40$ МГц·мм, будут занимать значительную часть активного объема. При увеличении межэлектродного зазора условия диффузионного охлаждения активного объема ухудшаются, и щелевая геометрия теряет свои преимущества. Действительно, охлаждение газа в щелевом зазоре происходит только в направлении водоохлаждаемых электродов, в то время как в трубке или в канале квадратного сечения – в радиальном направлении, т. е. примерно в 1.5 раза эффективнее.

Следует также отметить, что при увеличении межэлектродного зазора или диаметра трубки d становится нецелесообразным использование волноводного резонатора. Для эффективного подавления высших поперечных мод в волноводном резонаторе длиной L число Френеля $N_F = d^2/(4\lambda L)$ (где λ – длина волны) должно удовлетворять условию $N_F < 1/\pi$. Для выполнения этого условия при увеличении d длина L должна увеличиваться пропорционально d^2 , что приводит к трудностям в обеспечении однородности ВЧ разряда по длине резонатора [1–3, 7].

Н.А.Генералов, В.П.Зимаков, Н.Г.Соловьев, А.Н.Шемякин, М.Ю.Якимов, Н.А.Яценко. Институт проблем механики РАН, Россия, 119526 Москва, просп. Вернадского, 101, корп. 1; e-mail: yakimov@lantanlaser.ru

Поступила в редакцию 28 апреля 2005 г., после доработки – 13 сентября 2005 г.

В связи с этим представляет интерес изучение характеристик CO₂-лазера с диффузионным охлаждением и поперечным ВЧ разрядом в трубках с резонатором открытого типа.

Работы по использованию поперечного ВЧ разряда в трубках различного диаметра для накачки CO₂-лазеров проводились давно, однако их результаты были неоднозначными [1, 7–11]. Причина этого заключается, видимо, в том, что в рассматриваемых условиях ВЧ разряд может существовать в двух формах – так называемой слаботочной, или α -форме, и сильноточной, или γ -форме. Эти две формы разряда сильно различаются по структуре и характеристикам приэлектродных слоев. Решающее значение данное различие приобретает в лазерах с диффузионным охлаждением, где межэлектродное расстояние сравнимо с суммарной толщиной приэлектродных слоев, а сами слои занимают значительную часть поверхности, ограничивающей разрядный объем. Сильноточная γ -форма по ряду причин считается непригодной для использования в лазерах с диффузионным охлаждением, хотя и успешно применяется в лазерах с конвективным охлаждением активной среды [1–3].

Другой важной особенностью ВЧ разряда является отмечаемая авторами работ [12–15] повышенная активность в отношении разложения CO₂, которая может служить основной причиной снижения мощности лазера. Это может быть следствием процессов в приэлектродных областях, которые в поперечном ВЧ разряде распределены по всей длине разрядного объема. Решить данную проблему можно путем применения катализатора, способствующего восстановлению CO₂ в приэлектродных областях разряда. В [16] весьма подробно исследована работа распределенного по поверхности трубки золотого катализатора в разряде постоянного тока. Однако условия в приэлектродных зонах поперечного ВЧ разряда отличаются от условий в разряде постоянного тока, т. к. плазма приэлектродных слоев не является квазинейтральной и характеризуется высокими энергиями электронов и ионов.

Цель настоящей работы – изучение возможности создания эффективного отпаянного CO₂-лазера с диффу-

зионным охлаждением и накачкой поперечным ВЧ разрядом частотой 27.1 МГц в диэлектрической трубке. Особое внимание уделено повышению выходной мощности и КПД лазера путем стабилизации химического состава лазерной смеси с помощью распределенного по поверхности разрядной трубки катализатора на основе золота для восстановления CO_2 .

2. Модельный эксперимент

На первом этапе была изготовлена небольшая модель установки. Она предназначалась для изучения работы различных конфигураций электродов и выбора наилучшей из них. Кроме того, на этой модели отработывался процесс нанесения катализатора, определялась необходимая плотность покрытия и его стойкость в условиях ВЧ разряда.

Схема модели показана на рис.1. Она представляет собой кварцевую трубку с внутренним диаметром 13 мм. Разрядная часть имела длину 60 см. Охлаждение осуществлялось трансформаторным маслом, протекавшим через рубашку охлаждения с внешней стороны трубки. Резонатор состоял из глухого сферического медного зеркала с радиусом кривизны 4 м и коэффициентом отражения 98 % и выходного плоского зеркала из ZnSe с коэффициентом отражения 90 %. Для питания разряда использовался ВЧ генератор мощностью 2 кВт, работающий на частоте 27.1 МГц.

При выборе конфигурации электродов авторы руководствовались изложенными в монографии [1] соображениями о том, что при накачке лазера с диффузионным охлаждением ВЧ разрядом, имеющим приэлектродные слои γ -типа, может быть выгодным использование электродов с возможно меньшей площадью для уменьшения так называемого эффекта теплового экранирования объема трубки приэлектродным слоем γ -типа, для которого характерно значительное тепловыделение непосредственно на внутренней стенке трубки, прилегающей к слою. При этом предполагалось, что, несмотря на локальный ввод тока в объем трубки, диффузионные процессы могут привести к более или менее равномерному заполнению сечения трубки плазмой разряда. Лазер с подобной конфигурацией электродов был описан также в работе [11].

Нами было испытано несколько конфигураций электродов. Три из них и соответствующие им формы свечения разрядов показаны на рис.2, а–в. Сами электроды представляли собой медные трубки диаметром 2.5 мм, плотно прижатые к разрядной трубке с внешней стороны. Видно, что ни в одном из этих вариантов не наблюдалось достаточно однородного заполнения разрядом

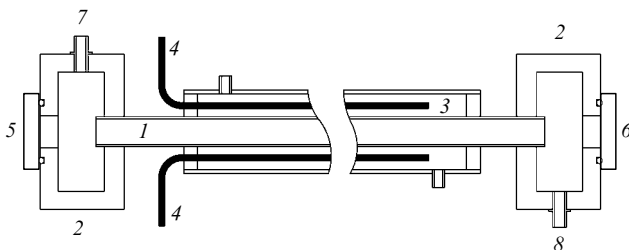


Рис.1. Схема конструкции модельного лазера: 1 – разрядный объем; 2 – юстировочные блоки; 3 – рубашка охлаждения; 4 – шины для подвода ВЧ тока к электродам; 5, 6 – зеркала оптического резонатора; 7, 8 – штуцеры подачи и откачки лазерной смеси.

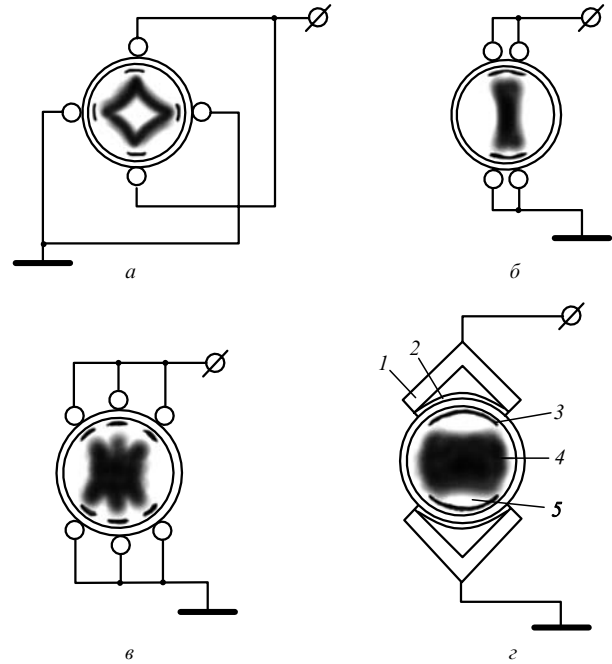


Рис.2. Различные схемы расположения ВЧ электродов: электродные системы из четырех трубок (а), попарно расположенных трубок (б), тройных трубок (в) и система с электродами из фольги (г): 1 – дюралевоуголки; 2 – алюминиевая фольга; 3 – светящиеся приэлектродные области; 4 – плазма положительного столба; 5 – темные приэлектродные области.

сечения трубки, что расходится с данными, приведенными в [1, 11]. Возможно, такое расхождение связано с меньшим диаметром разрядных трубок, использовавшихся в наших экспериментах. Мощность излучения во всех случаях не превышала 10 Вт. Наилучшие результаты удалось получить с широкими электродами, конструкция которых показана на рис.2, г. В этом случае положительный столб разряда равномерно заполнял большую часть трубки. Уголкового профиля из дюралюминия в этой конструкции играет одновременно роль проводника ВЧ тока и элемента, обеспечивающего жесткость конструкции в продольном направлении, а электроды представляют собой полоски алюминиевой фольги, плотно прилегающие к стенке разрядной трубки.

Эксперименты по генерации лазерного излучения проводились на модели с электродной системой, показанной на рис.2, г, как в режиме с обменом смеси, так и в отпаянном режиме. В обоих случаях использовался один и тот же состав рабочей смеси газов – $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}:\text{Xe} = 1:3:16:1$. Относительно высокое содержание ксенона позволяет снизить потери мощности в приэлектродных слоях. Для измерения мощности излучения применялся измеритель РW-250 фирмы Synrad. Мощность, вкладываемая в разряд, измерялась методом калориметрии охлаждающей жидкости с учетом мощности выходного лазерного излучения.

Полученная зависимость мощности излучения от скорости обмена смеси показана на рис.3. Наибольшая мощность излучения составляла 42 Вт, максимальный КПД – 10 %. Зависимости мощности излучения и КПД от вкладываемой ВЧ мощности как в режиме с обменом смеси, так и в отпаянном режиме, показаны на рис.4. В обоих случаях выходная мощность достигает максимума при вкладываемой мощности около 400 Вт, однако в отпаянном режиме выходная мощность не превышала 22 Вт, а

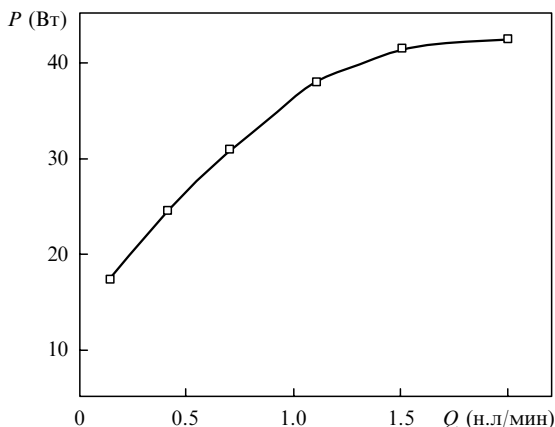


Рис.3. Зависимость мощности излучения P от скорости обмена смеси Q в модельном лазере с длиной разряда 60 см (н.л – нормальные литры).

максимальный КПД был меньше 7 %. Следует отметить, что коэффициент отражения использовавшегося в описанных экспериментах выходного зеркала (90 %) не являлся оптимальным при указанной выше небольшой разрядной длине (60 см). Этим объясняется низкий КПД лазерной генерации, а также значительное различие максимальных мощностей, полученных в отпаянном режиме и в режиме с обменом смеси.

Уменьшение выходной мощности при переходе к отпаянному режиму свидетельствует о снижении коэффициента усиления из-за разложения CO_2 . Об изменении

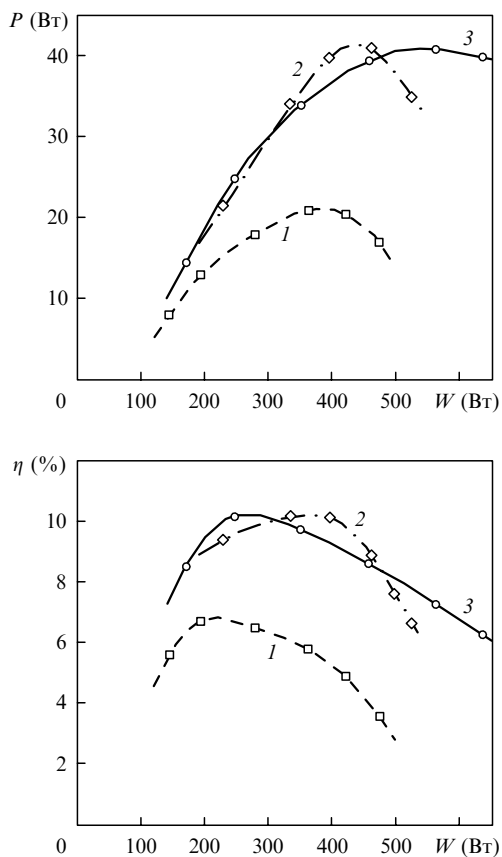


Рис.4. Зависимости мощности излучения P и КПД η от вкладываемой ВЧ мощности W , полученные в модельных экспериментах при работе без катализатора в отпаянном режиме (1) и в режиме с обменом газа (2; $Q = 2$ н.л./мин), а также при работе с катализатором (3).

состава смеси в отпаянном режиме можно было также судить по изменению цвета положительного столба разряда, который при работе в режиме с обменом смеси был розовым, особенно со стороны входа газа в разряд. При переходе к отпаянному режиму цвет разряда практически сразу становился бело-голубым по всей длине. На основании этих наблюдений был сделан вывод о необходимости применения катализатора для регенерации CO_2 .

Обращает на себя внимание довольно большая для такого короткого разряда скорость обмена смеси, при которой стабилизируется мощность излучения (рис.3). Скорость обмена 1.5 н.л./мин (н.л – нормальные литры, т.е. количество газа, которое занимает объем 1 л при нормальных условиях) соответствует скорости движения газа в зоне разряда более 6 м/с и среднему времени пребывания порции газа в разряде менее 0.1 с. Для лазеров на разряде постоянного тока со стабилизацией состава рабочей смеси путем медленной прокачки типичное среднее время пребывания порции газа в разряде, как указано, например, в [16, 17], на порядок больше – около 1 с. Объяснение этого явления следует искать в принципиальном отличии структуры поперечного ВЧ разряда от структуры продольного разряда постоянного тока. Приэлектродные слои, условия в которых сильно отличаются от условий в области положительного столба, распределены по всей длине поперечного ВЧ разряда. По-видимому, именно процессы в приэлектродных слоях определяют плазмохимические процессы в ВЧ разряде.

По нашему мнению, решающим для понимания работы лазера в исследуемом диапазоне параметров является вопрос о природе приэлектродных слоев ВЧ разряда, наблюдавшегося в модельных экспериментах. Удельная плотность вкладываемой мощности достигала 7.5 Вт/см^3 , что соответствует плотности тока разряда свыше 40 mA/см^2 (экспериментальные и расчетные данные по характеристикам разряда в сходных условиях приведены, в частности, в [18]). Это превышает характерную плотность тока для перехода из α - в γ -форму при разряде с металлическими электродами, которая в рассматриваемом случае составляет около 20 mA/см^2 [1, 3]. Картина свечения в поперечном сечении разряда (рис.2,з) также напоминает сильнооточный разряд, характеризующийся наличием темного пространства между приэлектродным и объемным свечением. По-видимому, в данном случае наблюдается переходная форма от α - к γ -разряду, когда вторично-эмиссионные процессы в приэлектродных слоях уже настолько интенсивны, что приводят к формированию структуры свечения, характерной для γ -формы, но диэлектрическая стенка между плазмой и металлическим электродом препятствует контракции приэлектродного слоя, и разряд в целом сохраняет пространственную однородность. Повышенная плазмохимическая активность разряда также может указывать на то, что приэлектродные слои по своим свойствам близки к слоям γ -разряда. Приэлектродные слои α -разряда в электротехническом смысле больше похожи на емкость и характеризуются низкой диссипацией ВЧ мощности, поэтому плазмохимические свойства α -формы ВЧ разряда не должны сильно отличаться от свойств разряда постоянного тока.

Таким образом, поскольку повышенная плазмохимическая активность γ -формы обусловлена приэлектродными процессами, применение распределенного катализатора может оказаться особенно эффективным для лазера на разряде рассматриваемого типа.

3. Катализатор

В экспериментах с катализатором покрытие наносилось на внутреннюю стенку разрядной трубки. В [16] описан способ нанесения покрытия методом катодного распыления отдельными участками длиной 20 см. При этом авторы [16] указывают на возможную неоднородность получаемого покрытия. Учитывая это, в настоящей работе покрытие наносилось сразу на всю длину трубки, занимаемую разрядом. Процесс напыления контролировался визуально. В результате получалось полупрозрачное покрытие серо-синего оттенка, которое впоследствии под действием разряда становилось розовым.

В [16] описана довольно сложная процедура предварительного активирования катализатора. Наши эксперименты показали, что при работе в отпаянном режиме в этом нет необходимости. После напуска свежей смеси катализатор активировался в течение 10–15 с горения ВЧ разряда. Процесс активирования можно было наблюдать по изменению цвета положительного столба разряда от бело-голубого к розовому, а также по возрастанию мощности лазерного излучения. В дальнейшем при работе на той же смеси активность катализатора сохранялась.

На рис.5 приведены участки спектра излучения плазмы поперечного ВЧ разряда в кварцевой трубке при работе без катализатора и с катализатором. Бело-голубой цвет плазмы разряда в отсутствие катализатора обусловлен увеличением концентрации молекул CO вследствие разложения молекул CO₂ и соответствующим ростом интенсивности свечения системы В¹Σ – А¹П молекул CO в полосах с максимумом на $\lambda = 451.1, 483.2$ и 519.4 нм.

В некоторых случаях при работе с катализатором возникала проблема замыкания тока разряда через покрытие. Частичное удаление покрытия со стенок трубки предотвращало это замыкание, но уменьшало площадь покрытия и, тем самым, его эффективность.

В ходе экспериментов выяснилось, что не слишком плотный слой катализатора практически не проводит тока, и в то же время проявляет достаточно высокую каталитическую активность. При этом образуется покрытие, состоящее из микроскопических, изолированных друг от друга кристаллов золота, в которых атомы связаны между собой сильной металлической связью. Средняя толщина такого покрытия больше толщины слоя сплошного металлического золота при одинаковом количестве нанесенного материала. В наших экспериментах было установлено, что заметная проводимость появляется при средней толщине покрытия (определенной из зависимо-

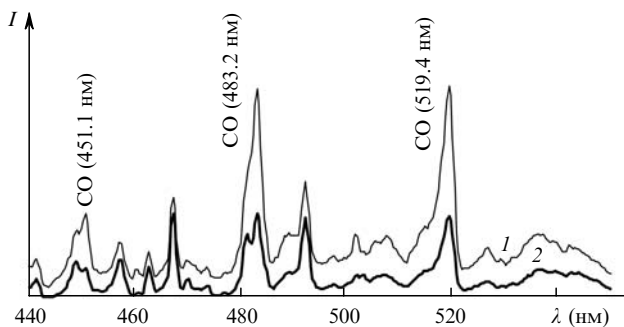


Рис.5. Сравнение участков спектра излучения плазмы поперечного ВЧ разряда в кварцевой трубке без катализатора (1) и с катализатором (2).

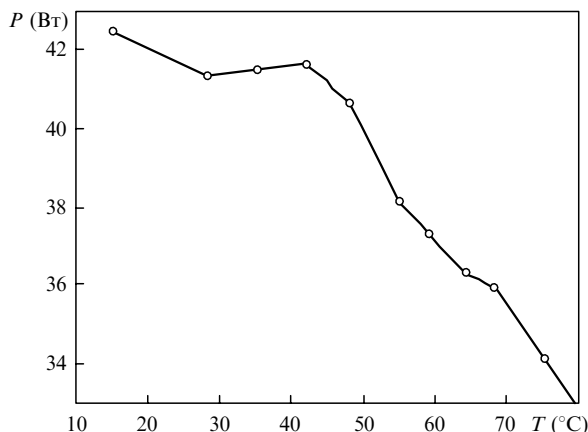


Рис.6. Зависимость мощности излучения P в отпаянном режиме с катализатором от температуры охлаждающей жидкости T .

сти проводимости покрытия от толщины, измеренной методом многолучевой интерферометрии [19]) 30 нм и более, а при толщине до 20 нм проводимость не наблюдается.

С другой стороны, известно, что максимальной каталитической активностью в отношении окисления моноокси углерода до двуокси, даже в отсутствие возбужденных молекул или атомов кислорода, обладают кристаллы размером порядка нескольких нанометров [20]. Таким образом, можно утверждать, что методом катодного распыления можно наносить непроводящие покрытия с высокой каталитической активностью в отношении восстановления CO₂, пригодные для применения в условиях поперечного ВЧ разряда.

Зависимости мощности излучения и КПД от вкладываемой в разряд ВЧ мощности для трубки без катализатора и с катализатором показаны на рис.4. Качественно они не отличаются от приведенных в работах [16, 21] для разряда постоянного тока. В обоих случаях применение катализатора позволило практически удвоить мощность излучения и получить в отпаянном режиме почти такие же характеристики, как и в режиме с обменом смеси, что видно из рис.4. Отличие отпаянного режима от режима с обменом смеси заключается в том, что максимальная мощность достигается при большем энергокладе, что также согласуется с данными работ [16, 21].

Испытание стойкости такого покрытия к действию разряда в течение нескольких десятков часов не показало каких-либо изменений внешнего вида и каталитических свойств покрытия.

В ряде работ, ссылки на которые можно найти в [13], отмечен рост активности золотого катализатора при увеличении температуры одной из стенок разрядного канала до 50 °С. Нами измерена выходная мощность модельного лазера в зависимости от температуры охлаждающего масла в диапазоне 15–75 °С. Результаты представлены на рис.6. Видно, что при увеличении температуры до 45 °С мощность излучения меняется мало, а при дальнейшем росте температуры она быстро падает.

4. Экспериментальный лазер

На основании полученных в модельном эксперименте результатов был спроектирован и изготовлен экспериментальный вариант отпаянного лазера, рассчитанный на мощность излучения 400 Вт. Схема этого лазера пока-

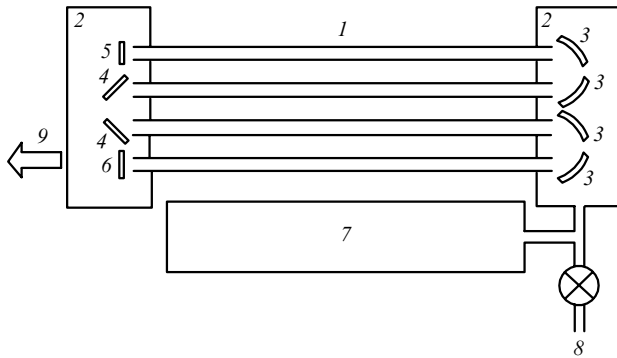


Рис.7. Схема экспериментального лазера с выходной мощностью 400 Вт и последовательным соединением разрядных трубок: 1 – разрядные трубки; 2 – блок зеркал; 3 – фокусирующие и корректирующие поворотные зеркала; 4 – плоские поворотные зеркала; 5 – глухое зеркало; 6 – выходное зеркало; 7 – резервный объем; 8 – к системе откачки и напуска газа; 9 – выход излучения.

зана на рис.7, внешний вид излучателя – на рис.8. Четыре кварцевые трубки, соединенные в жесткую конструкцию, размещались в стальном корпусе квадратного сечения. На трубках закреплялись электроды длиной 120 см каждый, подобные показанным на рис.2,з. Катализатор наносился на внутреннюю поверхность трубок по всей длине электродов. Выступающие из корпуса концы трубок уплотнялись в блоках зеркал, изготовленных из дюралюминия. Блоки зеркал крепились к фланцам корпуса с помощью позиционирующих вставок.

Оба конца заземляемых электродов соединялись между собой и с выводом на корпусе медными шинами. Электроды, на которые подавалось ВЧ напряжение, были изолированы друг от друга, и каждый имел свой вывод в середине корпуса (рис.8). Для увеличения времени работы в отпаянном режиме служил резервный объем (6 л), соединенный с разрядным объемом. Разрядные трубки охлаждались потоком трансформаторного масла, прокачиваемого со скоростью 17 л/мин через внутреннюю полость корпуса. Они подсоединялись к ВЧ генератору посредством согласующих резонансных LC-контуров. Подбором индуктивностей эти контуры настраивались так, чтобы разрядный ток во всех трубках был одинаковым, а отраженная мощность – минимальной.

Использовался тот же ВЧ генератор, что и в модельных экспериментах. Мощность генератора была равна

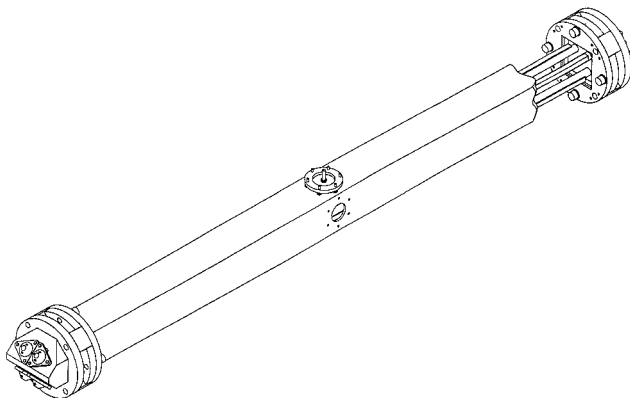


Рис.8. Общий вид экспериментального лазера. Часть корпуса у фланца справа удалена, чтобы показать расположение разрядных трубок.

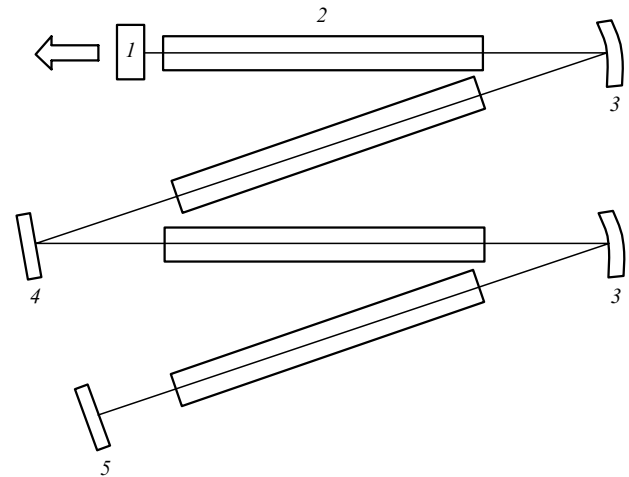


Рис.9. Схема резонатора полной длины, использовавшаяся для расчетов:

1 – выходное частично отражающее плоское зеркало; 2 – разрядная секция; 3 – двухзеркальный фокусирующий элемент в виде сферического зеркала; 4 – двухзеркальный поворотный элемент в виде плоского зеркала; 5 – глухое плоское зеркало; резонатор половинной длины получается соединением элементов 1–2–3–2–5 (поворотный элемент 4 заменяется плоским глухим зеркалом 5).

2 кВт, частота – 27.1 МГц. Мощность лазера достигала максимального значения при оптимальном согласовании генератора с нагрузкой, когда мощность, отдаваемая генератором в нагрузку, была максимальной. Вклад мощности в единицу объема активной среды при максимальной вкладываемой мощности 2 кВт составлял около 3 Вт/см³, что примерно вдвое меньше оптимального, определенного в модельном эксперименте для трубок с катализатором. Характерная для такой удельной вкладываемой мощности эффективная плотность тока ВЧ разряда 25 мА/см² соответствует аномальному режиму горения слаботоchnого ВЧ разряда. В то же время поперечная структура свечения разряда, как можно было наблюдать с торцов трубок, была аналогична наблюдавшейся в модельных экспериментах (рис.2,з).

Расчет оптического резонатора проводился для реальной конструкции лазера с выходной мощностью 400 Вт. Для учета отрицательной тепловой линзы принималось, что при номинальной мощности на выходе лазера в ВЧ разряде в виде тепла выделяется излучение мощностью около 3 кВт, и это тепло отводится в стенки за счет теплопроводности. Для объединения в один резонатор четырех разрядных секций длиной 120 см каждая использовались поворотные зеркала, установленные под углом 45° к оси трубок и передававшие излучение последовательно от трубки к трубке (рис.7). При общей конструктивной длине резонатора $L = 5.8$ м и внутреннем диаметре трубки 13 мм число Френеля $N_F = 0.7$. При таком диаметре трубок режим открытого резонатора ($N_F > 1$) может быть реализован при $L < 2.75$ м, а волноводного ($N_F < 0.3$) – при $L > 11$ м.

Для реализации режима устойчивого резонатора открытого типа с учетом компенсации рассеивающей тепловой линзы, возникающей в разрядных секциях, была выбрана схема, приведенная на рис.9. Излучение в каждой трубке распространялось, как в устойчивом резонаторе, близком к полуконфокальному (с учетом отрицательной тепловой линзы), а резонатор в целом представлял собой четыре одинаковых устойчивых резонатора,

соединенные последовательно. Выходное и глухое зеркало 1 и 5, а также поворотные зеркала 4 были плоскими.

Конструкция лазера позволяла также осуществлять генерацию на двух независимых параллельных резонаторах половинной длины. При этом вместо глухого зеркала 5 (рис.7) устанавливалось второе выходное, а плоские поворотные зеркала 4 (рис.7) заменялись на два глухих зеркала резонатора, также плоских. Получались два параллельных резонатора в два раза меньшей длины, каждый из которых, в свою очередь, состоял из двух соединенных последовательно устойчивых резонаторов, таких же, как и в случае резонатора полной длины. Поскольку параметры фокусирующих зеркал оставались в обоих случаях одинаковыми, одинаковым был и объем, занимаемый излучением в каждой трубке. Сравнение суммарной выходной мощности двух параллельных резонаторов с выходной мощностью резонатора полной длины при прочих равных условиях позволяло судить о потерях в резонаторе, вызываемых оптическими искажениями в активной среде.

Фокусирующие элементы 3 были выполнены в виде зеркал, отражающих излучение под углом 45° , как показано на рис.7. Для коррекции астигматизма, возникающего при отражении под углом 45° от фокусирующего зеркала, использовались цилиндрические зеркала. Настройка резонатора с цилиндрическими зеркалами вызвала некоторые трудности из-за повышенных требований к точности ориентации осей цилиндров. Для окончательной настройки использовался следующий метод. В отверстие для глухого зеркала вкладывался цилиндр с нанесенными на его торец рисками в виде креста. Изображение креста наблюдалось через отверстие выходного зеркала. Путем небольших поворотов цилиндрических зеркал искажения этого изображения удавалось полностью устранить.

Использовались выходные зеркала из селенида цинка с коэффициентами отражения 30 % и 50 %. При работе с длинным резонатором испытывались оба зеркала. Мощность излучения на выходе лазера в обоих случаях была примерно одинакова, что говорит о близости этих двух значений коэффициента отражения к оптимальному. При работе с двумя короткими резонаторами применялись выходные зеркала с коэффициентом отражения 50 %.

Мощность излучения каждого из двух параллельных резонаторов половинной длины составила 185 Вт, что соответствует съему мощности с единицы длины активной среды 0.77 Вт/см при КПД 18.5 %. При использовании резонатора полной длины была получена мощность 280 Вт (0.58 Вт/см) при КПД 14 %.

Структура излучения лазера в поперечном сечении пучка на выходе из резонатора в первом приближении представляла собой кольцо диаметром около 10 мм, соответствующее ТЕМ₀₁-моду открытого устойчивого резонатора. На кольцо накладывалась более сложная дифракционная картина, указывающая на присутствие в выходном пучке излучения, отраженного стенками трубок. Влияние стенок трубок на процесс генерации свидетельствовало о наличии рассеянного излучения в резонаторе и связанных с ним потерь, приводивших к снижению выходной мощности лазера.

О роли оптических искажений в активной среде можно судить, сравнивая выходную мощность резонатора полной длины (280 Вт) с суммарной мощностью двух параллельных резонаторов половинной длины (370 Вт).

Объем и конфигурация излучения в разрядных трубках, а также прочие условия, влияющие на лазерную генерацию, в обоих случаях были примерно одинаковыми. Различие заключалось в том, что в резонаторе полной длины оптические неоднородности активной среды приводили к накоплению нескомпенсированных искажений волнового фронта пучка, что вызывало рост потерь. Эффект накопления нескомпенсированных искажений мы объясняем тем, что рассеивающая тепловая линза, при расчете полагавшаяся осесимметричной, в действительности имела значительную цилиндрическую составляющую, связанную со структурой поперечного ВЧ разряда.

5. Заключение

Результаты, полученные в настоящей работе, подтверждают возможность создания эффективного СО₂-лазера с поперечным ВЧ разрядом в диэлектрической трубке с оптическим резонатором открытого типа. Успешное применение распределенного катализатора на основе золота показало, что основной причиной неоднозначности характеристик подобных лазеров может быть высокая плазмохимическая активность ВЧ разряда в рассматриваемом диапазоне параметров. При повышении удельного энерговклада формируются приэлектродные слои переходного типа, характеризующиеся большей по сравнению со слоями слабого ВЧ разряда диссипацией энергии и плазмохимической активностью. Катализатор, эффективно и устойчиво работая в этих условиях, позволяет нейтрализовать вредное влияние плазмохимических процессов, что является, по нашему мнению, основным результатом настоящей работы.

Создан экспериментальный лазер на четырех разрядных трубках длиной 120 см каждая, рассчитанный на выходную мощность 400 Вт. Лазер был испытан с ВЧ генератором мощностью 2 кВт, недостаточной для выхода лазера на полную мощность. Тем не менее удалось достичь довольно высоких параметров – выходной мощности в расчете на единицу длины активной среды 0.77 Вт/см при КПД 18.5 %.

Было показано, что оптические неоднородности активной среды ограничивают возможности роста мощности лазера путем простого увеличения числа трубок. Основным источником оптических искажений, по-видимому, являются неоднородности тепловыделения в поперечном ВЧ разряде. Технически эта проблема может быть решена, если расположить электроды по спирали либо уменьшить длины отдельных разрядных секций.

Работа частично выполнена в рамках проекта «Синтез», финансировавшегося Министерством образования, науки и технологий РФ. Авторы выражают свою искреннюю признательность фирме ООО «Лантан Лазер» за финансовую и всестороннюю техническую поддержку настоящей работы. Авторы также благодарны В.А.Кузнецову за интерес к работе и полезные обсуждения.

1. Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А. *Высокочастотный емкостной разряд. Физика. Техника эксперимента. Приложения* (М.: Наука, 1995).
2. Colley A.D., Baker H.J., Hall D.R. *Appl. Phys. Lett.*, **61**, 136 (1992).
3. Яценко Н.А. *Препринт ИПМ АН СССР № 338* (М., 1988).
4. Wieneke S., Born S., Vioel W. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **33**, 1282 (2000).
5. Markillie G., Deile J., Schlueter H. *Laser Focus World*, **39** (10), 75 (2003).

6. Nabich U., Heursch A., Plum H.-D., Poprawe R. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3267**, 66 (1998).
7. Липатов Н.И., Пашинин П.П., Прохоров А.М., Юров В.Ю. *Труды ИОФАН*, **17**, 53 (1989).
8. Гойхман В.Х., Гольдфарб В.М. *ЖПС*, **21**, 456 (1974).
9. Калмыков А.В., Мойсеев В.Т., Смирнов А.С., Толмашевич С.В. *Тезисы докл. V Всесоюз. конф. «Оптика лазеров»* (Л., 1986, с. 60).
10. He D., Hall D.R. *Appl. Phys. Lett.*, **43**, 726 (1983).
11. Рябых В.Н., Свич В.А., Топков А.Н. *Квантовая электроника*, **11**, 1651 (1984).
12. Cherezov V.M., Novgorodov M.Z., Ochkin V.N., Samorodov V.G., Shishkanov E.F., Stepanov V.A., Witteman W.J. *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*, **71**, 503 (2000).
13. Starostin S.A., Udalov Y.B., Peters P.J.M., Witteman W.J. *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 3337 (2000).
14. McArthur B.A., Tulip J. *Rev. Sci. Instr.*, **59**, 712 (1988).
15. Веснов И.Г., Мольков С.И., Степанов В.А., Шишканов Е.Ф. *Квантовая электроника*, **30**, 15 (2000).
16. Macken J.A., Yagnik S.K., Samis M.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **25**, 1695 (1989).
17. Boscolo I., Bernardini P. *Il Nuovo Cimento D*, **10**, 407 (1988).
18. Wester R., Seiwert S. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **24**, 1371 (1991).
19. Mead C.A. *Phys. Rev. Lett.*, **8**, 56 (1962).
20. Wallace W.T., Whetten R.L. *J. Am. Chem. Soc.*, **124**, 7499 (2002).
21. Козлов Г.И., Качалин А.В., Кузнецов В.А., Сидоренко О.Г. *Письма в ЖТФ*, **18** (15), 93 (1992).