

Неоднородности активных сред газовых лазеров (проблемы, исследования, результаты) / А.С. Борейшо, В.В. Лобачев, В.Л. Мошков // Научное приборостроение. -1992. -Т. 2. -№ 3: Лазеры и современное приборостроение. - С. 30-40.

Предлагаются результаты комплексного исследования пространственной и временной структуры возмущений в активных средах. Проведен всесторонний анализ причин их появления с поиском путей снижения влияния последних до приемлемого уровня для наиболее мощных газовых лазеров: непрерывных газодинамических, химических и электроразрядных, а также импульсных фотодиссоционных и эксимерных систем.

Сдвиговая и тальбот-интерферометрия, как и ожидалось, наиболее полно удовлетворяют жестким условиям стендового эксперимента. Достоверность количественной информации значительно повысилась за счет совмещения интерферометров между собой. Использование в качестве критерия числа Штреля позволило подойти к проблеме аттестации оптического качества активных сред с единых позиций. Библ. 14 назв. Ил. 12.

А. С. Борейшо, В. В. Лобачев, В. Л. Мошков
(Балтийский государственный технический университет,
Санкт-Петербург)

НЕОДНОРОДНОСТИ АКТИВНЫХ СРЕД ГАЗОВЫХ ЛАЗЕРОВ (проблемы, исследования, результаты)

Имеющиеся результаты исследований оптических неоднородностей, возникающих в активных средах различных газовых лазеров (например, [1, 2]), могут быть дополнены данными, полученными в последние годы сотрудниками кафедры лазерной техники Балтийского государственного технического университета. Исследования посвящены изучению пространственной и временной структуры возмущений в активных средах, всестороннему анализу причин их появления, а также поиску путей снижения их уровня для наиболее мощных газовых лазеров: непрерывных газодинамических (ГДЛ), химических (НХЛ) и электроразрядных (ЭРЛ), а также импульсных фотодиссоционных (ФДЛ) и эксимерных систем (ЭЛ). Работы на установках проводились на стендах и совместно с сотрудниками НПО ГИПХ и НИИЭФА.

Методика исследования

Основными свойствами лазерного луча, определяющими возможность его фокусировки на малой мишени или передачи энергии на большие расстояния, являются высокая пространственная когерентность и малая расходимость. Для мощных газовых лазеров, в которых используются большие объемы или большие расходы активной среды, эти свойства во многом зависят от оптического качества последней, а следовательно, и от газодинамического совершенства. Фазовые неравномерности, в общем случае, являются следствием неравномерностей плотности газа, а при наличии процессов смешения - и концентраций отдельных компонентов. Для регулярных неоднородностей справедливо соотношение [3]

$$\Delta \Phi = \frac{2\pi}{\lambda} L K \frac{\rho}{\rho_0} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta K}{K} \right),$$

где $\Delta \Phi$ — среднеквадратичный разброс фазы, K — постоянная Гладстона-Дейла, ρ, ρ_0 — плотность газа в области резонатора и при нормальных условиях соответственно, L — длина пути распространения света в активной среде, λ — длина волны излучения.

Для случайных неоднородностей величина L должна быть заменена на комплекс $\sqrt{\Lambda L}$, где Λ — характерный размер пульсаций.

Очевидно, что такие газодинамические явления в активной среде, как турбулентность, изменение плотности газа на скачках уплотнения, в пограничных слоях и следах, а также в результате процесса самовоздействия неминуемо отразятся на качестве лазерного луча. Поэтому представляется обоснованным использование числа Штреля Sr , рассчитываемого на основании скалярной дифракции [4]

$$Sr = \max \left\{ \frac{1}{l_x^2 l_y^2} \left| \iint_S \exp \left[-j \varphi(x_1, y_1) \right] \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda Z} (xx_1 + yy_1) \right] dx_1 dy_1 \right|^2 \right\}$$

или представляемого в виде аппроксимационного соотношения [5] $Sr \approx \exp(-\Delta \Phi^2)$ не только как характеристику луча, но и как достоверный критерий однородности активной среды. Однако число Штреля носит интегральный характер и мало затрагивает структуру возмущений фазы; одинаковые значения числа могут быть получены для аберраций волнового фронта, имеющих различные пространственные частоты, подходы к уменьшению которых существенно различаются.

Представляет определенный интерес диагностика оптического качества активных сред крупномасштабных газовых лазеров, структура возмущений в которых может иметь существенные отличия по сравнению с таковой небольших модельных установок. Значительная сложность исследуемых объектов не исключает применения оптических методов исследования, однако в каждом конкретном случае требуется серьезная адаптация известных диагностических методик. В частности, при изучении больших объемов активной среды с высокими уровнями инверсии населенностей остро встает проблема защиты оптических элементов от воздействия излучения суперлюминисценции. Термические напряжения, вызванные его поглощением, приводят к аберрациям, на порядок превышающим измеряемые величины, и ставят перед необходимостью применения спектрально-неоднородной оптики (рис. 1).

В качестве основных методов диагностики использовались сдвиговая и тальбот-интерферометрия [6, 7], которые наиболее полно удовлетворяют жестким требованиям стендового эксперимента. Где позволяли условия, проводилось совмещение интерферометров между собой или с другими оптическими методами (голографическая интерферометрия, метод Теллера).

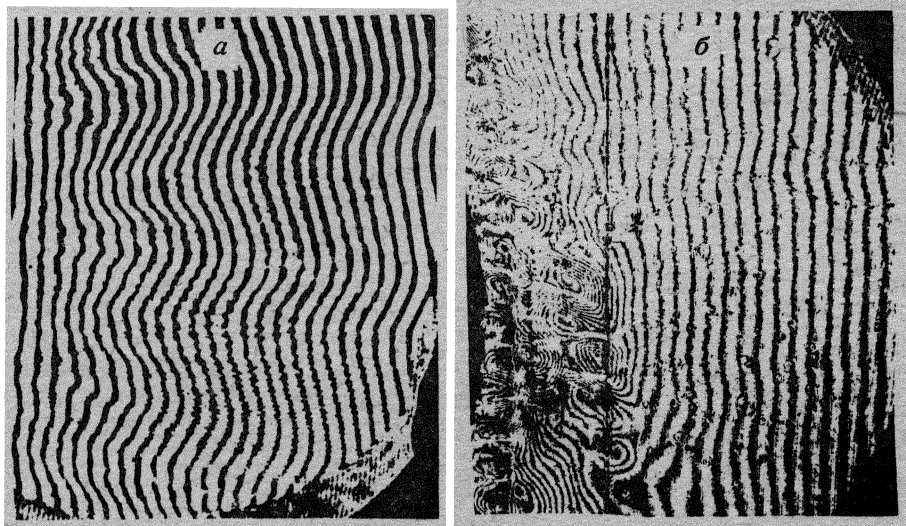


Рис. 1. Термические напряжения элементов проходной оптики, вызванные поглощением излучения.

a — полезный сигнал, *б* — термические искажения.

Электроразрядные лазеры

Исследовалась оптическая однородность активных сред быстропроточных ЭРЛ с возбуждением разрядом постоянного тока и емкостным ВЧ-разрядом. Известно, что дозвуковой режим течения

разряда приводит к разогреву и разгону газа в разрядной камере. Невысокие характерные числа Рейнольдса ($Re \sim 10^4$) указывают на заметную роль вязких эффектов в формировании структуры течения. На рис. 2, на котором изображены две голографические интерферограммы, видно, что объемное тепловыделение в газе приводит к росту вниз по потоку пограничных слоев, при этом поперечные профили плотности в канале имеют характерную *M*-образную форму, которая должна оказывать существенное влияние на число Штреля. В разряде постоянного тока определенное значение имеет и дискретность катода, вблизи которого реализуется область повышенного тепловыделения (на интерферограмме полосы сгущаются к ножевым катодам), вследствие чего вблизи катодной платы возникает продольный периодический масштаб неоднородностей, соизмеримый по уровню с величиной неоднородности в потоке в поперечном направлении.

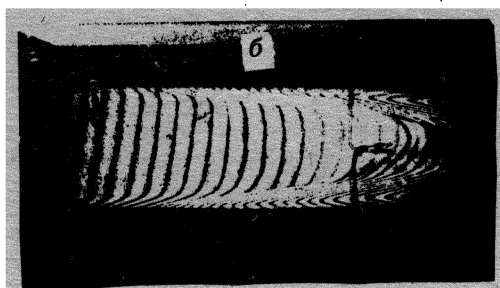
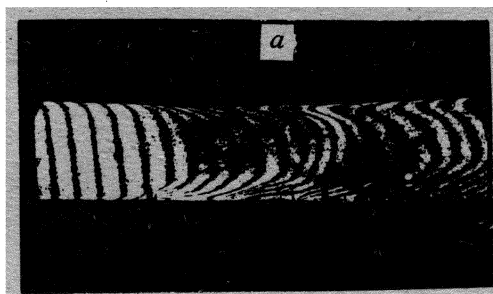


Рис. 2. Голографические интерферограммы потока в разрядной камере.

a — разряд постоянного тока с ножевыми катодами, *б* — емкостной ВЧ-разряд.

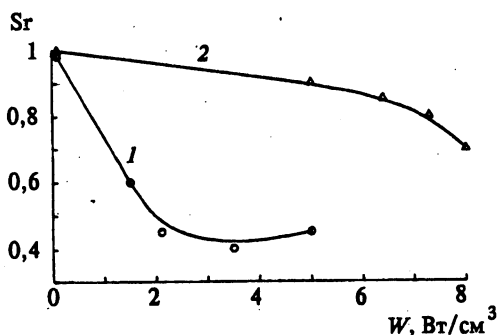


Рис. 3. Зависимости числа Штреля от мощности энергозатраты в разряд.

1 — постоянный ток, *2* — ВЧ-поле.

Представляет интерес зависимость интегрального критерия оптической однородности потока от основного режимного параметра работы лазера — мощности энергозатраты в разряд. Данные для разряда постоянного тока получены по результатам обработки тальбот-интерферограмм в апертуре зондирования 30×30 мм. Для ВЧ-разряда обрабатывались голографические интерферограммы в апертуре 30×50 мм. Такие апертуры выбраны исходя из геометрии реального неустойчивого резонатора, характерного для лазеров соответствующих размеров. Длина пути по лучу в активной среде при-

нималась равной 2 м. Зависимости S_g от мощности энергозложения в разряд (рис. 3) иллюстрируют явную тенденцию снижения оптической однородности потока с увеличением энергозложения. Детальный анализ этого факта показал, что в ядре потока в обоих случаях реализуется искажение типа "оптический клин" и основное влияние на изменение S_g оказывают быстросрастающие пограничные слои, которые на расстоянии 200 мм вниз по потоку могут занимать до 40% поперечного сечения канала. Для разряда постоянного тока дискретизация катодной платы приводит дополнительно к снижению числа Штреля в среднем на 30%. Следует отметить, что соответствующей ориентацией рядов ножевых катодных элементов относительно направления вывода излучения можно практически полностью устранить указанный продольный периодический масштаб неоднородностей.

Газодинамические лазеры

Среди всевозможных конструкций сопловых блоков ГДЛ можно выделить две основные: блоки плоских сопел и сопловые блоки сотовой конструкции. Исследование оптической однородности активной среды проводилось для ГДЛ с предварительной подготовкой рабочего тела для обеих конструкций сопловых аппаратов.

Тальбограмма, изображенная на рис. 4, а, показывает детальную структуру потока за блоком плоских лопаток, а рис. 4, б представляет собой теневую фотографию потока за срезом модельного соплового блока сотовой конструкции плотной упаковки. Следствием достаточно высоких чисел Маха (5...7) является наличие в потоке интенсивных косых скачков уплотнения, которые отчетливо просматриваются на обеих фотографиях. На тальбограмме визуализированы и спутные следы с характерным профилем плотности.

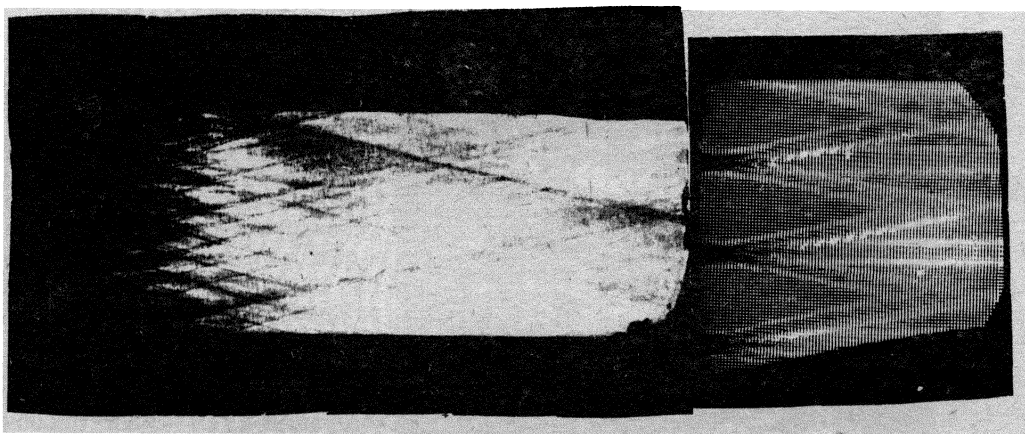


Рис. 4. Структура потока за срезами сопловых аппаратов ГДЛ.
Объяснение в тексте.

Обработка тальбюграмм потока за набором плоских сопел показала, что в области, ограниченной сопловым блоком и боковыми пристенными скачками уплотнения, реализуется интегрально практически однородный поток, особенность которого состоит в присутствии в нем искажения типа "оптический клин". Это искажение связано с линейным восстановлением плотности вниз по потоку на скачках уплотнения в пределах исследуемой апертуры, а также с линейным характером размывания спутных следов. Следует отметить, что оптический клин не приводит к уменьшению числа Штреля, а лишь смещает центр диаграммы направленности, т.е. для указанной области расходимость будет иметь практически дифракционный предел.

Для лазеров с наборами осесимметричных сопел интересна зависимость интегрального (вдоль направления зондирования оптического качества) газо-

динамического потока от угла ориентации рядов сопел относительно направления вывода излучения, как это было рассмотрено в [8], а далее детально изучено в [9].

Исследования зависимости Sr от угла β (рис. 5) показали, что имеются предпочтительные направления зондирования, в частности, при 5° . Это же обстоятельство полностью совпадает с результатами численного моделирования, основанного на расчете пространственной структуры ударных волн и спутных следов за срезом соплового блока [9]. Интегральная компенсация неоднородностей за счет оптимальной ориентации соплового блока позволила увеличить значение числа Штреля более чем в 3 раза.

Приведенные результаты характерны для лазеров, имеющих малые и средние размеры. В лазерах с лопаточными сопловыми блоками рост высоты лопаток может привести в процессе работы к их деформациям и возникновению вибраций и тем самым способствовать турбулизации потока, тем более, что числа Рейнольдса находятся в переходной области ($Re \sim 10^5$). Случайный, нестационарный

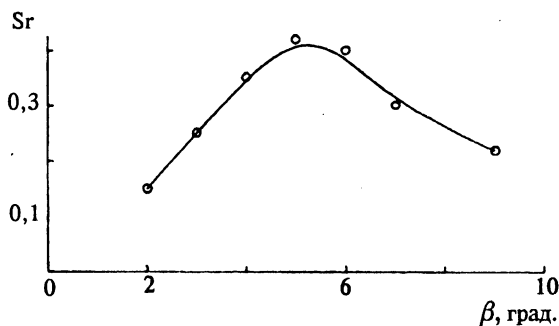


Рис. 5. Зависимость числа Штреля от угла ориентации рядов сопел.

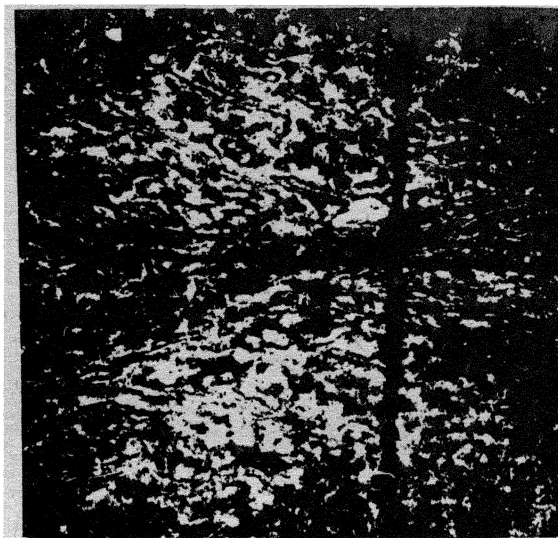


Рис. 6. Интерферограмма потока за срезом лопаточного соплового блока ГДЛ при ультракороткой экспозиции.

характер неоднородностей в активной среде может быть выявлен при этом применением ультракоротких экспозиций (рис. 6). Увеличение высоты лопаток (следовательно, и размера выводной апертуры лазера) при неизменном выходном сечении каждого сопла приводит и к повышению доли нелинейности составляющей в волновом фронте, что связано с нелинейным характером восстановления плотности вниз по потоку на скачках уплотнения, интенсивность которых затухает на расстояниях 20...30 калибров от соплового блока.

Непрерывные химические лазеры

Течение газа в НХЛ характеризуется умеренными числами Рейнольдса ($Re < 1000$) [10] и содержит все характерные для сверхзвукового течения вязкого газа особенности, такие как скачки уплотнения вследствие взаимодействия струй, пограничные слои. Структура потока также осложнена смешением двух компонентов, имеющих различные теплофизические и оптические свойства, и обильным выделением тепла в результате химической реакции. Именно эти процессы и определяют оптическую однородность активной среды в НХЛ.

С другой стороны, структура возмущений зависит от организации процесса смешения, поэтому поиск оптимального способа подмешивания водорода является одной из основных технических задач. Рис. 7 показывает влияния конструкции соплового аппарата на величину и характер неоднородностей, при этом числа Штреля могут изменяться от 0,65 до 0,95. Данная информация полезна при проведении комплексной оптимизации лазерной установки по подходам, изложенным в [11].

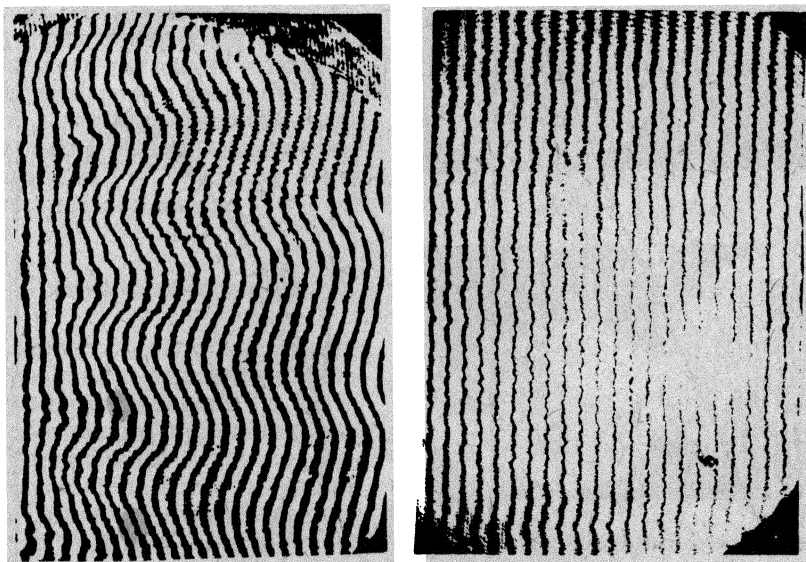


Рис. 7. Примеры влияния конструкции соплового аппарата НХЛ на величину и характер неоднородностей.

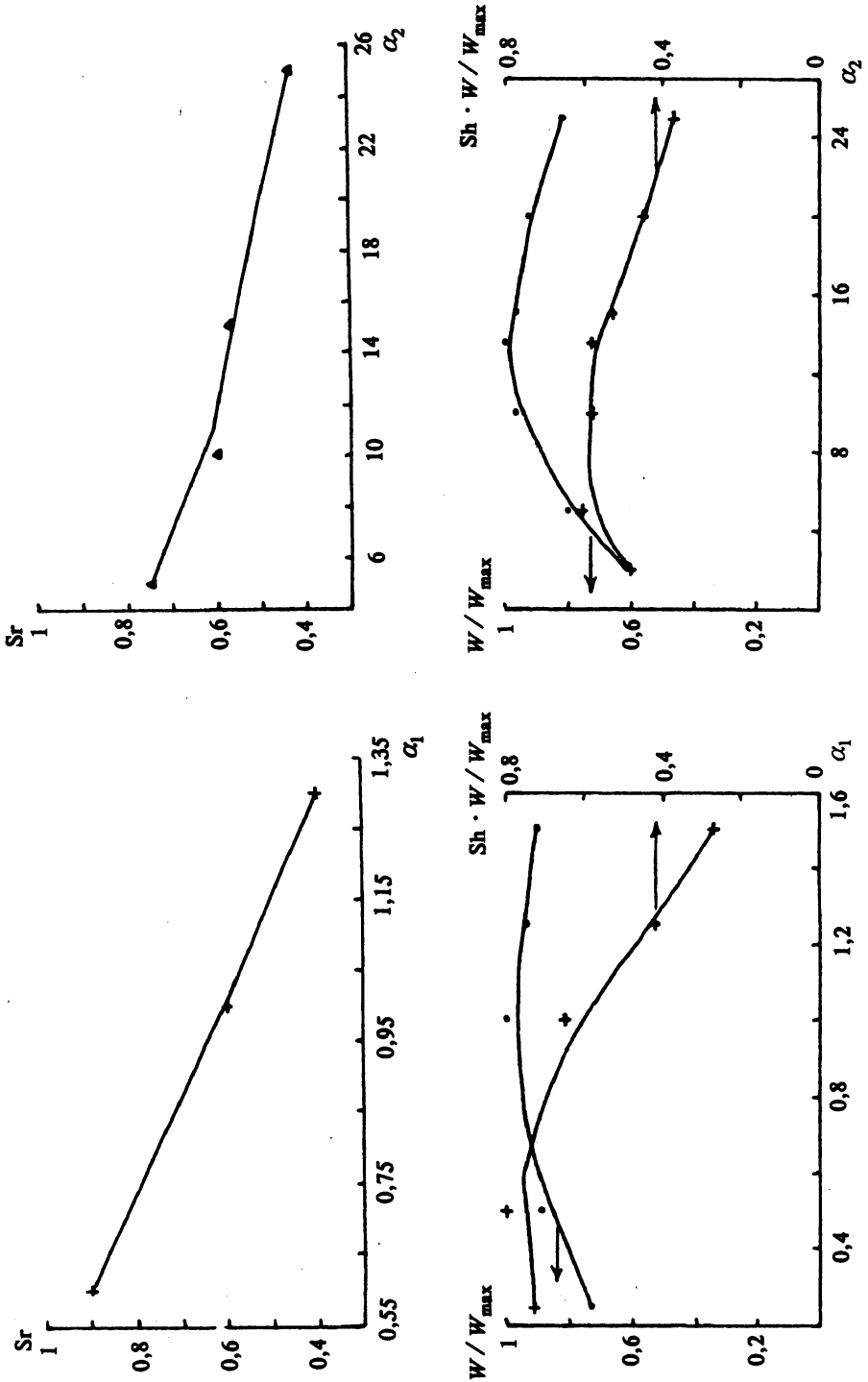


Рис. 8. Комплексные критерии эффективности НХЛ.

Для каждой схемы смешения существует связь между величиной фазовых искажений и режимными параметрами работы установки. Естественно, что как и для электроразрядных лазеров, в НХЛ при увеличении интенсивности основных процессов (т.е. возрастании расходов G , коэффициента избытка горючего α и других характеристик, приводящих к росту выходной мощности), наблюдается ухудшение оптического качества среды. Это позволяет обсуждать возможность выработки комплексных критериев эффективности лазера, учитывающих как энергетические показатели активной среды (коэффициент усиления слабого сигнала, мощность и т.п.), так и ее оптическую однородность. Эти критерии необходимы для поиска оптимальных параметров работы системы (рис. 8).

Величина возмущений в активной среде НХЛ определяется двумя основными факторами: поперечной неравномерностью распределения сильно преломляющего холодного водорода и изменением газодинамических характеристик потока вследствие химической реакции. Подбором режимов функционирования системы подготовки рабочего тела удалось "отключить" горение в сверхзвуковом потоке, не изменяя общий уровень рефракции среды. Число Штреля в данном случае оказалось на 25% выше, что характеризует вклад химической реакции в потерю оптической однородности активной среды. Последние результаты были использованы при разработке и исследовании перспективных сопловых аппаратов трехструйного смешения [12]. Развитие идеи введения нейтральной прослойки между струями окислителя и горючего оказалось плодотворным — эксперименты показали значительное улучшение однородности активной среды (см.рис. 8).

Анализ сдвиговых интерферограмм активных сред исследуемых НХЛ позволил также сделать заключение о ламинарном характере течения. Все картины имеют высокий контраст, следовательно, в среде отсутствуют случайные нестационарные возмущения плотности, вызванные турбулентными пульсациями в потоке.

Импульсные системы

Процессы, лежащие в основе создания инверсной населенности в импульсных ЭЛ и ФДЛ, обуславливают принципиально нестационарный характер неоднородностей. В ЭЛ причиной их возникновения является передача энергии электронного пучка газу с последующим распадом разрыва газодинамических параметров. На рис. 9

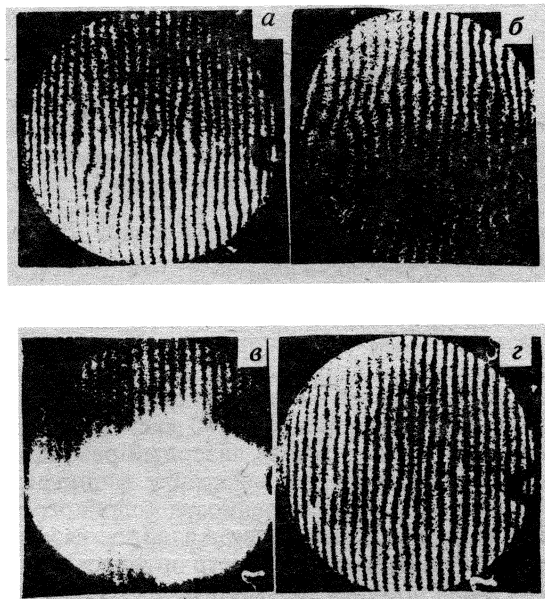


Рис. 9. Интерферограмма возмущений для ЭЛ.
 а — He, $p = 760$ мм рт. ст., $t = 500$ мкс; б — Kr, $p = 10$ мм рт. ст., $t = 250$ мкс; в — 750 He + 10 Kr + $+2 F_2$, $p = 760$ мм рт. ст., $t = 0$; г — 750 He + 10 Kr + $+2 F_2$, $p = 760$ мм рт. ст., $t = 500$ мкс.

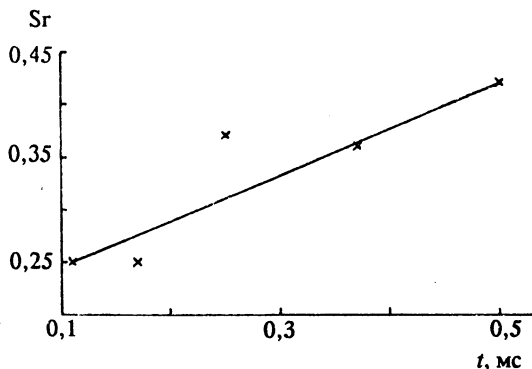


Рис. 10. Зависимость числа Штреля от времени для ЭЛ.

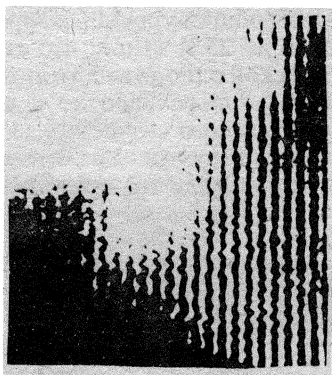


Рис. 11. Интерферограмма возмущений для ФДЛ.

ция быстрой смены активной среды. Другим важным результатом исследования явилось обнаружение зависимости возмущений от состава рабочего газа (см. рис. 9).

Иной случай имеет место в ФДЛ, где неоднородности формируются, и их распределение изменяется во время импульса генерации. Более того, само излучение в активной среде является основной причиной появления этих неоднородностей — явление самовоздействия (рис. 11). Полученные за время импульса генерации (30—40 мкс) последовательности интерферограмм, зарегистрированные сквозь лазерный резонатор, позволяют оценить пространственные и временные масштабы возникающих возмущений (0,3...0,5 мм, не более 2 мкс). Неоднородности подобного типа трудно поддаются коррекции и приводят к рассеянию света в широком угле. Если число Штреля по-прежнему рассматривать как параметр оптического качества активной среды, то, учитывая нарастающий характер таких неоднородностей, последнее будет существенно падать (рис. 12). Форма кривой качественно совпадает с приведенной в [3], где рассматривались процессы самовоздействия в CO_2 -электроионизационном лазере.

показаны интерферограммы возмущений в газовой среде в результате воздействия электронного пучка при λ -видной конфигурации его ввода [13]. Эксперименты по изучению временного поведения таких неоднородностей, проведенные с использованием техники, сочетающей сдвиговую интерферометрию и высокоскоростную фотографию, показали, что времена существования значительных искажений волнового фронта на несколько порядков превосходят характерные длительности генерации. В случае полной эксимерной смеси числа Штреля не превышают значения 0,5 даже через 1 мс после воздействия пучка (рис. 10). Очевидно, что данные неоднородности в первую очередь ограничивают частоту повторения импульсов, если принять условие, что расходимость должна быть не хуже заданной наперед величины. Для дальнейшего повышения частоты повторения необходимо применение глушителей, эффективно ослабляющих волны давления [14] и (или) организа-

Возникновение в активной среде подобных возмущений в первую очередь снизит длительность импульса генерации, имеющего дифракционно-ограниченную расходимость.

Основные выводы

Сдвиговая и тальбот-интерферометрия, как и ожидалось, наиболее полно удовлетворяет жестким условиям стендового эксперимента. Проведенные эксперименты позволили получить данные об оптическом качестве

активных сред газовых лазеров различных типов. Достоверность количественной информации повысилась за счет совмещения интерферометров между собой. Использование в качестве критерия числа Штреля позволило подойти к проблеме аттестации оптического качества активных сред с единых позиций.

Пространственные масштабы регулярных неоднородностей в непрерывных газовых лазерах определяются особенностями конструкции проточной части. В ГДЛ, НХЛ и ЭРЛ с ножевыми катодными элементами в потоке активной среды возникают периодические фазовые искажения, что дает возможность использовать для их устранения механизмы интегральной самокомпенсации, за счет оптимальной ориентации возмущающих элементов относительно направления вывода излучения. Влияние непериодических искажений (например, пограничных слоев на электродах разрядной камеры ЭРЛ) может быть исключено прямым устранением их из области рабочей апертуры лазера.

В рабочих средах импульсных лазеров развиваются неоднородности, которые влияют на длительность импульса генерации и на частоту повторения импульсов. Первые из них возникают в результате эффекта самовоздействия и их уменьшение может быть связано с поиском оптимального состава смеси. Возникновение других обусловлено распадом газодинамических разрывов после импульса генерации; для снижения влияния последних необходимо использование специальных глушителей и (или) прокачки рабочей среды.

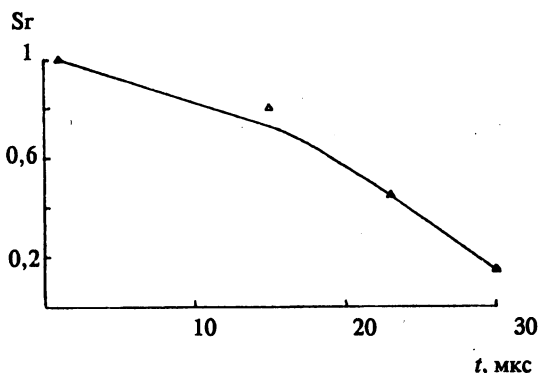


Рис. 12. Зависимость числа Штреля от времени для ФДЛ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sutter L. V., Baily R. K. // Appl. Opt. 1979. V. 18, № 22. P. 2203-2210.
2. Cenker A. A., Driscoll R. J. // AIAA J. 1982. V. 20, № 6. P. 813-819.
3. Glessner J. W., Tanner P. D., Walter R. F., Dent G. C. // Proc. of the conf. SPIE. - Los Angeles, Calif. 1990.
4. Борн М., Вольф Э. Основы оптики М., 1973. 417 с.
5. Quinell R. D. // SPIE. 1981. V. 293. P. 12-19.
6. Малакара Д. Оптический производственный контроль. М., 1985. 250 с.
7. Коряковский А. С., Марченко В. М., Прохоров А. М. // Труды ИОФ АН СССР. 1987. Т. 7. С. 33-91.

8. *Russel D. A., Shu Y. K.*//Proc.of the IV Intern.Symp.on Gasdynamic and Chemical Lasres. Italy. 1983.

9. *Борейшо А. С., Дуюнов С. И., Лобачев В. В. и др.*//ПМТФ. 1989. № 4. С. 94-98.

10. *Химические лазеры* / Под ред.Р. Гросса, Дж. Ботта. М., 1980. 550 с.

11. *Даути Дж.*//АКТ. 1990. № 2. С. 53-59.

12. *Duran D. A., Varwig R. L.* Performance of triple sled nozzle for chemical laser application //Rep. № TR-0074(4240-10)-2. The Aerospace corp., El. Segundo, Calif. 1973.

13. *Hoffman J. M., Pattersom E. L., Gerber R. A.* // J. Appl. Phis. 1979. № 6. P. 3861-3866.

14. *Lin J. M., Zukowski T. J.*//AIAA - Pap. 90-1796.. - 1990.

Рукопись поступила 10.03.92