

ЭФФЕКТИВНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ЖИДКОСТНОГО ЛАЗЕРА С ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ ЧАСТОТОЙ

Г.А.Весничева, А.Ю.Иванов

Известно, что условиями стабильной генерации жидкостного лазера являются а) наличие в объеме зоны генерации внутрирабочего объема достаточного количества молекул активной среды (в данном случае раствора смеси органических красителей); б) равномерное распределение красителя по объему зоны генерации; в) наличие хорошо съюстированного высокооборотного дисперсионного оптического резонатора, внутри которого размещается рабочий объем с активной средой, позволяющий поддерживать генерацию на выбранной рабочей длине волны.

Поскольку под действием импульса накачки молекулы красителя частично дезактивируются ("выгорают"), то необходима их равномерная смена внутри зоны генерации с тем, чтобы во время действия каждого импульса накачки в объеме зоны генерации присутствовала свежая порция молекул красителя. Для равномерной смены красителя необходимо, чтобы поток красителя был ламинарным. Таким образом, для выполнения условий стабильной генерации необходим высокоскоростной ламинарный поток красителя через объем зоны генерации внутри рабочего объема (кюветы) с красителем [1].

Обычно подобные условия реализуются с помощью перемешивающего элемента помещенного внутри кюветы с красителем [2], либо внешней гидравлической (пневматической) системы прокачки [1], либо с помощью конструкции типа сопло-ловушка [3]. Однако в каждом из этих случаев при определенных скоростях потока красителя неизбежно возникают его турбулентность, как чисто гидродинамическая, так и фототермодинамическая, вызываемая движением продуктов фотохимических реакций, инициируемых мощным пучком лазера накачки, а также турбулентность, возникающая из-за неизбежного захвата пузырьков воздуха извне струей красителя.

Чем выше скорость потока красителя и скорость оптической накачки, тем выше турбулентность, а следовательно, и хаотичность процессов в ней. Это ведет к снижению стабильности генерации жидкостного лазера, потере мощности и снижению частоты следования импульсов его генерации, размытию их формы т.е. понижению эффективности накачки и КПД лазера. Этот факт является серьезным недостатком всех жидкостных лазеров.

С другой стороны, по сравнению с каждой из известных лазерных систем жидкостной лазер на красителях обладает целым рядом преимуществ: плавной перестройкой длины волны генерации в широком спектральном диапазоне (0.26–1.3 мкм) при достаточно высокой импульсной мощности (до $10^{(3-5)}$ Вт) с хорошей формой импульса генерации; относительной простотой и компактностью конструкции; малыми энерго- и гидропотреблением, габаритами, весом и стоимостью [4].

С целью устранения указанного выше недостатка в данной работе рассмотрена динамика процесса генерации красителя совместно с динамикой его импульсного оптического возбуждения. Для этого произведен детальный анализ параметров потока красителя в активном элементе жидкостного перестраиваемого лазера, которые определяют эффективность накачки, КПД и генерационные характеристики лазера.

В качестве основных процессов, ограничивающих выполнение условий стабильной генерации, рассмотрены фотораспад ("выгорание") молекул красителя под действием импульса излучения накачки и их последующее восстановление, стробоскопический эффект, гидродинамическая и фототермодинамическая турбулентность потока красителя и тепловая конвекция раствора красителя под действием излучения накачки. Рассмотрены возможные конструктивные решения системы прокачки и активного элемента лазера на красителе.

Вследствие недостатков указанных выше конструкций в качестве базовой принимается конструкция кюветы с вращающимся цилиндрическим перемешивающим элементом, помещенным внутри кюветы с красителем [4].

Пусть r — радиус этой кюветы, а зона генерации внутри нее имеет диаметр $d_{зг}$ и длину $l_{зг}$. Тогда для исключения стробоскопического эффекта разумно потребовать, чтобы импульсы излучения накачки приходились на разные наборы молекул красителя, откуда следует

$$f_c \lesssim \frac{\omega}{1 + 2/d_{зг}}, \quad (1)$$

где f_c — частота следования импульсов накачки, ω — угловая скорость потока красителя.

Для оценки степени неравновесности процессов фотохимического распада и восстановления молекул красителя зададимся типичными для красителя фотохимическими константами: квантовой эффективностью фотораспада ξ (молекула/фотон) и временем их восстановления $\tau_{в,с}$. Тогда можно оценить границы скоростей потока красителя, внутри которых дезактивированные импульсом накачки молекулы красителя успевают бы восстановиться до прихода последующего импульса накачки (без учета стробоскопического эффекта),

$$\omega_{\min} = \frac{10r}{\pi d_{зг}^2 l_{зг}} \frac{1}{N_A N_M} \xi N_\phi, \quad (2)$$

где N_A — число Авогадро, N_M — молярная концентрация раствора красителя, N_ϕ — число фотонов в импульсе накачки;

$$\omega_{\max} = \frac{2\pi r}{d_{зг} \tau_{в}}. \quad (3)$$

Отсюда видно, что при согласовании динамики накачки и динамики потока красителя можно выбрать "окно", в котором фотохимические процессы становились бы достаточно стационарными.

Другим процессом, ограничивающим выполнение условий стационарной генерации, является гидродинамическая турбулентность потока красителя через объем зоны генерации. Этот поток можно считать

частным случаем течения Куэтта [5] между двумя вращающимися цилиндрами с соответствующими числами Рейнольдса

$$Re_{0,i} = \frac{\omega_{0,i} r_{0,i}^2}{\eta}, \quad (4)$$

где индексы 0 и i соответствуют внешнему и внутреннему цилиндрам радиусов r_0 и r_i , которые вращаются со скоростями ω_0 и ω_i ; η — кинематическая вязкость раствора красителя.

Из диаграммы зависимости $Re_i(Re_0)$ [5] видно, что вся область изменений Re_i и Re_0 подразделяется на 5 зон с различными режимами течения Куэтта, причем при больших Re_0 и не очень больших Re_i точка $Re_i(Re_0)$ попадает в крайне неустойчивую, сильно неравновесную область потока жидкости, а степень неравновесности $СНР \xrightarrow{Re_i \rightarrow 0} \infty$.

При этом граница между областями с ламинарным и непериодическим турбулентным режимами потока все более размывается, что дает основание для поиска возможных резонансов потока жидкости ("турбонов") и лазерного излучения (фотонтурбоновые резонансы), при которых поток может, наоборот, даже стабилизироваться, а его ламинарная и турбулентная части достаточно строго локализоваться. Как показал модельный расчет, при $Re_i \rightarrow 0$ и $Re_0 = 2 \cdot 10^4$ турбулентная часть потока локализуется вблизи центра кюветы с красителем в достаточно малой по размерам области, а основная масса потока красителя остается чисто ламинарной. При переходе же точки ($Re_i \rightarrow 0$, $Re_0 = 2 \cdot 10^4$) соотношение турбулентной и ламинарной частей потока $M_{\text{турб}}(M_{\text{лам}})$ скачкообразно обращается. На практике это позволяет при условии работы в области ($Re_i \rightarrow 0$, $Re_0 = 2 \cdot 10^4$) более чем в 20 раз повысить максимальное значение верхней границы скорости потока красителя по сравнению с [1].

Кроме описанной выше гидродинамической турбулентности потока красителя возможна также и его фототермодинамическая турбулентность. Она возникает вследствие того, что под действием излучения накачки жидкость в зоне генерации за времена порядка $10^{(8-6)}$ с достигает температур порядка $T_{\text{max}} \gtrsim 10^3 \text{ K}$ [6]. Естественно, при этом возникают большие тепловые градиенты и интенсивный перемешивающий фотоконвективный поток красителя может перейти в турбулентный режим. Для описания процесса теплопереноса необходимо решение системы соответствующих уравнений переноса тепла с граничными условиями $T(\infty, t) = T_0$, $T(0, t) = T_{\text{max}}$ и начальными уравнениями $T(\mathbf{r}, 0) = T(\mathbf{r}, \infty) = T_0$. Здесь $T(\mathbf{r}, t) \equiv T(x, y, t)$ — температура красителя в точке (x, y) в момент времени t , а T_0 — температура окружающей среды. Решение этой системы уравнений имеет вид

$$T(x, y, t) = \frac{P_0(1 - R')}{4c'\rho(\sqrt{\pi\chi})^3} \sum_{n=1}^{N'} \int_{t-\frac{n-1}{f_c}}^{t-(\tau_n - \frac{n-1}{f_c})} \left(\frac{d\tau}{(t_0 + \tau)\sqrt{\tau}} e^{-\frac{[x+v(t_0+\tau)]}{4\chi(t_0+\tau)}} \times \right. \\ \left. \times \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[e^{-\frac{(y-2ml_{gr}-R)^2}{4\chi(t_0+\tau)}} + e^{-\frac{(y+2ml_{gr}+R)^2}{4\chi(t_0+\tau)}} \right] \right), \quad (5)$$

где τ_n и P_0 — длительность и мгновенная мощность импульса излучения накачки; $v(x, y)$ — скорость потока красителя; $R = \sqrt{x^2 + y^2}$; R' — коэффициент отражения; $N' = fc^{-1}$, t_0 — временная константа; c' , ρ , χ — удельная теплоемкость, плотность и температуропроводность раствора красителя; $\kappa = \kappa/c'\rho$, κ — коэффициент теплопроводности; c — скорость света.

При определенных условиях, задаваемых параметрами импульса излучения накачки и характеристиками раствора красителя, можно вывести следующие закономерности.

Если интенсивность излучения накачки

$$I_t = \frac{4P_0}{\pi d_{3r}^2} \quad (6)$$

будет меньше определенной критической величины

$$I_{tc} = D \frac{\rho c' \eta^2}{(\sigma_a N_M) g \beta r'^3 \tau_n}, \quad (7)$$

где σ_a — оптическое сечение поглощения излучения накачки, β — объемный коэффициент теплового расширения раствора красителя, r' — месторасположение зоны генерации относительно центра кюветы, g — ускорение свободного падения, $D \lesssim 1$ — константа, то возникающий фотоконвективный поток красителя в турбулентный режим не перейдет.

С другой стороны, если число Рэлея

$$Ra = \frac{(\sigma_a N_M) I + g \beta r'^5}{\kappa \chi \eta} \quad (8)$$

будет больше критического значения

$$Ra_c = \frac{g^2 \beta r'}{c \chi \eta}, \quad (9)$$

то внутри кюветы будет происходить достаточно интенсивное фотоконвективное термоиндуцированное перемешивание красителя со скоростью

$$U_{conv} = \bar{D} \left(\frac{\eta^2}{\tau_n r'} \right)^{1/3}. \quad (10)$$

Таким образом, можно подобрать условия, при которых образуется “окно” в зависимости степени неравновесности процесса от характеристик потока красителя и излучения накачки, в котором разупорядоченность процесса будет малой. При этом скорость жидкостного потока красителя будет достаточной для стабильной замены рабочего набора его молекул в промежутке между импульсами накачки. Сам же поток через зону генерации будет чисто ламинарным, а скорость фототермоиндуцированного потока будет достаточна для интенсивного перемешивания красителя внутри кюветы. При этом дезактивированные

молекулы красителя к моменту их прихода в зону генерации, согласованного с моментом поступления туда импульса излучения накачки, успевают восстановиться, а выполнение условия (1) обеспечит исключение стробоскопического эффекта.

Таким образом, несмотря на сильную неравновесность системы поток раствора красителя—импульсное излучение накачки и соответственно сильную нестационарность и нелинейность задачи, удается обеспечить условия стационарной генерации жидкостного лазера на красителе ($a-r$), причем степень неравновесности даже существенно меньше, чем в обычных условиях. Это позволяет при сохранении энергии излучения генерации повысить более чем в 20 раз по сравнению с известными аналогами [1-5] частоту следования и мощность импульсов генерации лазера на красителе.

В связи с обнаружением эффективного режима генерации за счет "окна" пониженной неравновесности можно считать, что имеет место реализация закона чередования неравновесности [7].

Отметим еще одно преимущество найденного режима. На основании выражений (1)–(10) видно, что, варьируя положение и форму зоны генерации и параметры излучения накачки, можно работать с молекулами красителя с различными мгновенными характеристиками, что дает возможность простой безрезонаторной перестройки длины волны излучения генерации лазера на красителях.

По данной методике был проведен модельный расчет для типовых условий (краситель—родамин 6ж, накачка второй гармоникой импульсного неодимового лазера (0.532 мкм , 10^4 Вт , 10 нс)). Разработана конструкция активного элемента, при которой полностью исключена турбулентность потока красителя через зону генерации в диапазоне скоростей $1.2 \cdot 10^{-7} - 1333 \text{ л/с}$ при частотах следования импульсов генерации от 10^{-7} до 533 Гц , что более чем в 20 раз превышает типовое значение f_c [1-5]. На основе этого активного элемента был сконструирован лазер, который изготовлен, построен и испытан в работе и показал хорошие эксплуатационные характеристики (компактность, вибростойкость, малые энергопотребление и расход красителя, низкая стоимость и высокая экономичность). На его активный элемент было получено авторское свидетельство СССР [8].

Список литературы

- [1] ТО лазера ЛЖИ-502. М., 1981.
- [2] Патент ГДР № 211669. МКИ НО1 S 3/01. 18.07.84.
- [3] Заявка РСТ № 85104990. МКИ НО1 S 3/01. 3/02. 07.11.85.
- [4] Справочник по лазерам / Под ред. А.М.Прохорова. М.: Сов.радио, 1978. Т. 1-2.
- [5] Cooles D. // J. Fluid. Mech. 1965. Vol. 21. N 3. P. 385-425.
- [6] Скрябин И.А., Мурес Б.С., Бердинский А.В. // Тез. III Всесоюз. конф. "Применение лазеров в технологии и системы передачи и обработки информации". Таллин, 1987. Ч. 1 С. 116.
- [7] Скворцов Г.Е. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 17. С. 15-17.
- [8] А.С. СССР № 299169 от 28.12.90.

С.-Петербургский институт
авиационного приборостроения

Поступило в Редакцию
23 июля 1992 г.