

УДК 621.378 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖИМОВ ГЕНЕРАЦИИ МОЩНОГО МАЛОГАБАРИТНОГО ИМПУЛЬСНОГО ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ЛАЗЕРА НА КРАСИТЕЛЯХ.

© А.Ю. Иванов

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург.

Поступила в редакцию 18 марта 1999г.

В данной работе проведено исследование эффективности режимов генерации мощного малогабаритного импульсного перестраиваемого лазера на красителях. Приводится развернутый анализ динамики накачки растворов красителя и динамики процесса генерации активной среды совместно с динамикой вторичных процессов, инициируемых в процессе работы лазера. В результате проведенных теоретических расчетов по разработанной методике обнаружено окно квазиравновесности процесса генерации, в котором возможно существенное повышение эффективности режима генерации. Указаны границы этого окна и условия их достижения. Разработан, сконструирован и изготовлен оригинальный макет мощного импульсного малогабаритного перестраиваемого лазера на красителях совместно со световодной системой формирования, фокусировки и транспортировки пучка его излучения в рабочую операционную зону. Рассчитана и отработана рабочая смесь красителей, позволяющая получить высокие генерационные характеристики данного лазера на "экзотической" длине волны λ 504 нм, необходимой для проведения лазерной шоковой литотрипсии уратов и кальцитов при лечении мочекаменной и желчнокаменной болезней в практической урологии. Разработанный лазер был испытан и показал хорошие генерационные и эксплуатационные характеристики. Обсуждаются возможные практические применения разработанного прибора.

Одним из важнейших типов лазеров, широко используемых в повседневной практике, являются перестраиваемые лазеры на красителях. Как отмечается в новейшем обзоре мирового рынка лазерных технологий [1–2], область их применения в практике достаточно широка и постоянно расширяется.

Это объясняется рядом уникальных свойств таких лазеров, представляющих собой надежный мощный источник узконаправленного когерентного монохроматического излучения, легко перестраиваемого во всем видимом, а также в ближнем УФ- и ИК- спектральных диапазонах ($\lambda = 0,26–1,1$ мкм). Ни один из всех других типов лазеров этим свойством не обладает.

Однако, как правило, эти лазеры довольно сложны, громоздки и дороги, особенно их основной элемент — используемые в качестве активной генерационной среды органические красители. Поэтому область применения таких лазеров ограничена. Это обычно те области, где необходимо иметь мощный надежный лазерный источник излучения с высокими генерационными характеристиками либо перестраиваемый в достаточно широком спектральном диапазоне, либо генерирующий излучение на строго определенных длинах волн, недоступных или нерентабельных для других типов лазеров.

Такая ситуация довольно часто встречается в научно-исследовательском эксперименте и в практической медицине (диагностика, терапия, хирургия), т.е. там, где требуется обеспечить высокую

степень селективности рабочего процесса при желательном бесконтактном способе транспортировки лазерного излучения в рабочую зону.

Например, одним из самых перспективных способов лечения мочекаменной и желчекаменной болезней в практической урологии является импульсная лазерная литотрипсия. Установлено [3], что при мощности $P_0 \sim 100$ кВт и длительности импульса лазерного излучения $\tau \sim 1$ мкс на длине волны $\lambda = 504$ нм при поглощении лазерного излучения почечным или желчным камнем (урат, кальцит) на его поверхности формируется лазерная плазма, которая и далее продолжает адсорбировать энергию лазерного излучения. При этом быстро и непрерывно вырабатывается высокое давление внутри удаляемого камня, и возникает интенсивный фотоакустический эффект, за счет которого и происходит фрагментация и последующее удаление камня. Транспортировка лазерного излучения в рабочую зону процесса производится обычно по оптическому кварцевому световоду, что позволяет эффективно, быстро и практически безболезненно проводить вышеуказанную процедуру даже в таких отделах мочеточника, где требуется его значительное расширение и большой диаметр канала уретроскопа, а также при плотно зажатых камнях, в случае аккумуляции фрагментов камня вдоль канала мочеточника, при локализации камней в чашечках почки, при выраженных стриктурах и извилистости мочеточников. При этом коэффициент поглощения материала удаляемого камня на длине волны λ 504 нм доста-

точно велик (~75%), а коэффициент поглощения стенок используемого уретроскопа – мал (~3%). Таким образом, получение мощного узконаправленного пучка импульсного лазерного излучения, необходимого для проведения данной операции, является важной и перспективной для медицины, но весьма сложной для лазерной физики задачей. Такой режим лазерной генерации является достаточно “экзотическим”. Как показал анализ, в данное время получить необходимые характеристики такого лазерного пучка возможно только при использовании перестраиваемого лазера на красителях.

Рассмотрим условия создания и возможности повышения эффективности генерации такого лазера, позволяющие получить высокие генерационные характеристики в указанном выше диапазоне, т.е. высокую мощность ($P \sim 10^3$ Вт) при длительности импульса $\tau \sim 10^{-6}$ с с максимально высокой частотой их следования f на длине волны λ 504 нм и узкой диаграмме направленности $\Delta\phi \sim 10^{-3}$ рад. Последнее необходимо для снижения потерь при транспортировке излучения такого лазера в рабочую операционную зону с помощью кварцевого световода.

Для получения требуемых генерационных характеристик лазерного излучения требуется, во-первых, наличие достаточного количества молекул активной среды, допускающих выполнение инверсной заселенности с последующей лазерной генерацией на нужной длине волны с высокой квантовой эффективностью рабочего спектрального перехода j_r . Как показал анализ [4–8], в качестве такой активной среды наиболее разумно использовать жидкостные растворы органических красителей различной молярной концентрации N_m . По ряду причин (растворимость, вязкость, вредность, химические, термодинамические и генерационные характеристики) оптимальными активными средами такого лазера являются сложные высокомолекулярные биополимеры с большим молекулярным весом (кумарины, ксиленолы, аминокантрахиноны, оксадиазолы, родамины и пр.). В качестве растворителя удобнее всего использовать этанол или этиленгликоль высокой степени очистки.

Для возбуждения молекул активной среды на верхней энергетической уровень рабочего спектрального перехода необходимо обеспечить условия стабильной мощной оптической накачки на длине волны λ_n , чуть меньшей требуемой длины волны лазерной генерации λ_r , причем временные и пространственные характеристики излучения накачки должны обеспечивать высокую эффективность возбуждения лазерной генерации α_n с параметрами, удовлетворяющими требованиям поставленной задачи.

Для поддержания, усиления и управления параметрами полезного излучения лазерной генерации (λ , P , τ , $\Delta\phi$, f) необходимо наличие хорошо

сьюстированного высокодобротного дисперсионного оптического резонатора. Наконец, для транспортировки пучка полученного лазерного излучения в рабочую операционную зону нужна оптическая система формирования, фокусировки и транспортировки выходного пучка излучения описываемого лазера.

Проведенный теоретический анализ показал, что в качестве активной среды для создания лазера с требуемыми характеристиками оптимально использовать сложные смеси растворов кумаринов -7 и -127, С-7 и С-127, аминокантрахинона-101А-101 и незамещенного родамина RS в хорошо очищенном этиленгликоле EG или этаноле EtOH.

Оптическая схема исследуемого жидкостного лазера приведена на рис. 1.

Оптическая накачка 1 активной среды может быть либо ламповой, либо также лазерной. В качестве ламп накачки можно использовать либо отечественные Хе/Кг импульсные лампы типов ИСП, ИНП, ИФП, ДНП с водяным охлаждением, либо их зарубежные аналоги, например, Phillips TUV. Источником лазерной накачки может быть импульсный азотный или эксимерный лазеры с длиной волны генерации λ 337, 248, 282, 308 или 348 нм или 3-я, или 4-я гармоники твердотельного Nd³⁺: YAG- лазера с λ 353 или 266 нм. По ряду причин, в первую очередь, эксплуатационных и экономических, в качестве источника накачки была выбрана 3-я гармоника импульсного неодимового YAG- лазера 1 с λ 353 нм, $\tau \sim 1$ мкс и $P_0 \geq 1$ МВт. Для фокусировки излучения накачки 2 в зону генерации активного элемента 4 лазера на красителях использовался микротелескоп 3.

Аналогом оптического резонатора 16 описываемого лазера послужил высокодобротный двухпризмный 5 резонатор отечественного лазера типа ЛЖИ-502 [9] с коэффициентом отражения глухого зеркала 6 на длине волны λ 504 нм $\tau_r = 99.98\%$ и коэффициентом отражения выходного полупрозрачного зеркала 7 на рабочей длине волны $\tau_n = 50\%$. Для повышения добротности резонатора и уменьшения ширины линии генерации лазера внутри его резонатора между выходным зеркалом и активным элементом был введен многослойный интерференционный светофильтр 8 с коэффициентом пропускания на длине волны λ 504 нм $\tau_\phi = 75\%$ и шириной линии пропускания $\Delta\lambda_\phi = 3$ нм. Все оптические детали резонатора, включая окошки кюветы активного элемента, были изготовлены из оптического кварца марки КУ-ВИ, имели защитное интерференционное покрытие и высокую лучевую стойкость.

Система 15 формирования, фокусировки и транспортировки выходного пучка 9 излучения перестраиваемого лазера 16 в рабочую операционную зону 14 представляла собой кварцевую линзу 10 диаметром $D = 30$ мм с фокусным расстоянием

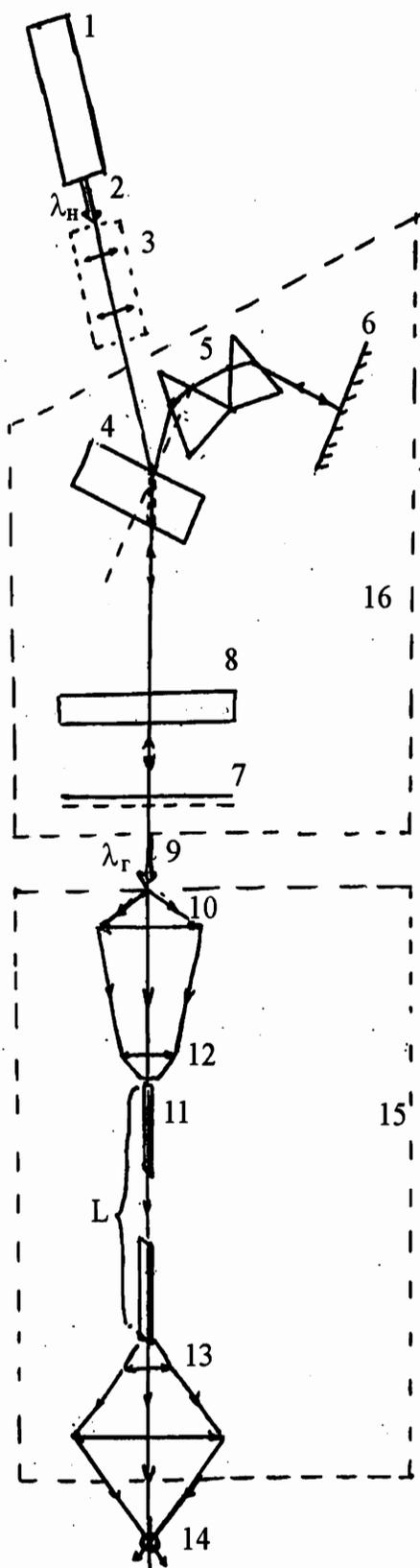


Рис. 1. Оптическая схема перестраиваемого лазера на красителях. Пояснения в тексте

$f = 100$ мм и кварцевый световод 11 диаметром $d = 400$ мкм длиной $L = 2$ м с фокусом 12 диаметром 3 мм с фокусным расстоянием 8 мм на входном конце и сферическими микролинзами 13 и 13' диаметром 3 мм и фокусным расстоянием 1,5 мм на выходном конце световода.

Серьезной проблемой жидкостных перестраиваемых лазеров является дезактивация ("выгорание") молекул красителя под действием мощного импульса накачки. В связи с этим необходимо их равномерная смена внутри зоны генерации в активном элементе такого лазера так, чтобы во время действия каждого импульса накачки в объеме зоны генерации присутствовал бы свежий набор молекул красителя. Для равномерной смены молекул красителя необходимо, чтобы поток красителя через объем зоны генерации был бы ламинарным. Таким образом, для выполнения условий стабильной генерации, а следовательно, повышения ее эффективности, необходим высокоскоростной ламинарный поток красителя через объем зоны генерации внутри рабочего объема (кюветы) с красителем.

Обычно подобные условия реализуются либо с помощью специального перемешивающего элемента, помещенного внутри кюветы с красителем [10], либо внешней системой гидравлической (пневматической) прокачки [11], либо с помощью конструкции типа "сопло-ловушка" [7]. Однако, в каждом из этих случаев при определенных скоростях потока неизбежно возникает его турбулентность как чисто гидродинамическая, так и фототермодинамическая, вызываемая конвекцией продуктов фотохимических реакций, инициируемых мощным пучком лазера накачки, а также турбулентность, возникающая из-за неизбежного захвата пузырьков воздуха извне струей раствора красителя и механической сепарации этой струи.

Чем выше скорость потока красителя и скорость оптической накачки зоны генерации, тем выше турбулентность, а, следовательно, и хаотичность процессов в ней. Это ведет к снижению стабильности генерации лазера, потере мощности и снижению частоты следования импульсов его генерации, размытию их временной формы и пр., т.е. к снижению к.п.д. лазера и, следовательно, к уменьшению эффективности его генерации.

С целью устранения этого недостатка, общего для всех жидкостных лазеров, в данной работе рассмотрена динамика процесса генерации красителя совместно с динамикой его оптического возбуждения (накачки).

В качестве основных процессов, ограничивающих выполнение условий стабильной генерации, рассмотрены: фотораспад (дезактивация) молекул красителя и их последующее восстановление; стробоскопический эффект; гидродинамическая и фототермодинамическая турбулентность потока красителя под действием излучения накачки; со-

гласование скоростей и условий протекания фотохимических реакций компонентов активной генерационной смеси красителей. Рассмотрены возможные конструктивные решения активного элемента лазера на красителях. Поскольку в конструкциях с внешней системой прокачки или в конструкциях типа "сопло – ловушка" помимо вышеуказанных процессов неизбежен еще и захват пузырьков воздуха струей красителя и механическая сепарация этой струи, а конструкции с перемеши-

вающим элементом внутри кюветы с красителем имеют еще и сложный внутренний профиль, громоздки и неудобны, от них разумно отказаться. В данной работе описывается принципиально новая конструкция активного элемента лазера на красителях в виде вращающейся кюветы цилиндрической формы. Однако, в качестве базовой все-таки была принята конструкция кюветы с перемешивающим элементом внутри кюветы с красителем [10].

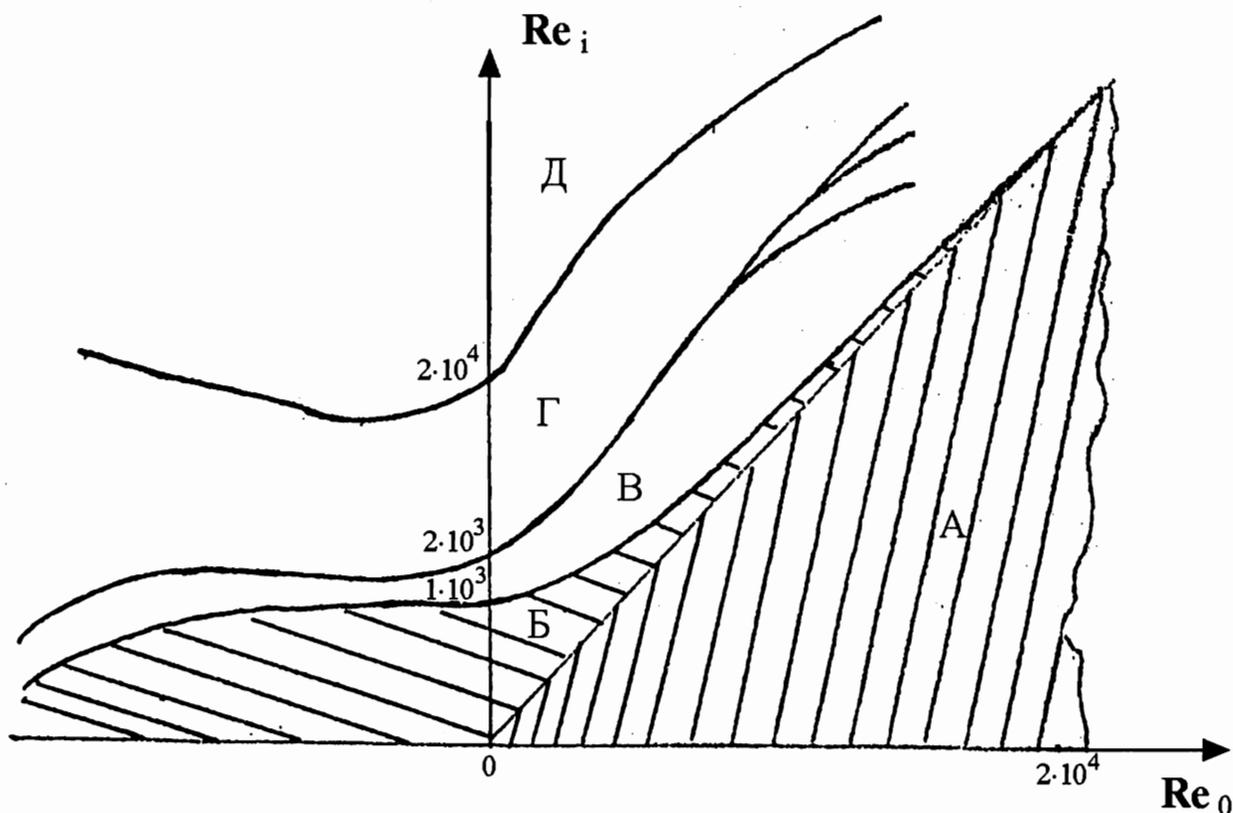


Рис. 2. Диаграмма зависимости чисел Рейнольдса Re_i (Re_0) потока красителя

Пусть r – радиус этой кюветы, а зона генерации внутри нее имеет диаметр d_{32} и длину l_{32} . Тогда для исключения стробоскопического эффекта логично потребовать, чтобы импульсы излучения накачки попадали бы на разные наборы молекул красителя, откуда следует:

$$f_c \leq \frac{\omega}{1 + r/d_{32}}, \quad (1)$$

где ω – угловая скорость потока красителя. Пусть квантовая эффективность фотораспада рабочих молекул красителя будет ξ , мол/фотон, а время их восстановления — τ_e с. Тогда можно оценить границы, внутри которых дезактивиро-

ванные импульсом накачки молекулы красителя успевают бы восстановиться:

$$\omega_{\min} = \frac{10r}{\pi d_{32}^2} \cdot \frac{1}{N_a} \cdot \frac{1}{N_m} \cdot \xi N_\phi, \quad (2)$$

$$\omega_{\max} = \frac{2\pi r}{d_{32}\tau_e}, \quad (3)$$

где N_a – число Авогадро, а N_ϕ – число фотонов в импульсе накачки;

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

При использовании в качестве активной среды лазера смеси растворов из 2 и более красителей, очевидно, необходима их фотохимическая совместимость, т.е. схожесть их природы и строения (биополимеры, кислоты, соли и т.д.), химическая нейтральность по отношению друг к другу и согласованность скоростей и условий протекания в них фотохимических реакций, т.е. должны выполняться условия:

$$\xi_1 \approx \xi_2 \approx \dots \approx \xi_k; \tau_1 \approx \tau_2 \approx \dots \approx \tau_k; \text{ и т.д.}, \quad (4)$$

где нижний цифровой индекс указывает на определенный компонент смеси из k компонентов.

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

Этот поток можно считать частным случаем потока Куэтта между двумя вращающимися цилиндрами с соответствующими числами Рейнольдса

$$\text{Re}_{0,i} = \frac{\omega_{0,i} r_{0,i}^2}{\eta}, \quad (5)$$

где индексы o и i соответствуют внешнему и внутреннему цилиндрам радиусов r_o и r_i , которые вращаются со скоростями ω_o и ω_i , а η — кинематическая вязкость рабочего раствора красителя. Из диаграммы зависимости $\text{Re}_i(\text{Re}_o)$ [12] (рис. 2) видно, что всю область изменения Re_i и Re_o можно условно разбить на 5 зон: А — непериодический, Б — ламинарный, В — одноперидический, Г — двухперидический и Д — турбулентный режимы потока красителя. Если точка $\text{Re}_i(\text{Re}_o)$ попадает в области Б или Д, то поток жидкости чисто ламинарный или чисто турбулентный. В области В поток чисто тейлоровский, одноперидический в аксиальном направлении с ячеистой структурой, включающей в себя турбулентные пробки (“турбоны”), причем соотношение их объемов $M_{\text{турб}}$ (турбулентной части потока) и $M_{\text{лам}}$ (ламинарной части потока) определяется соотношением $\text{Re}_i(\text{Re}_o)$ (рис. 3). В области Г поток становится двухперидическим, т.к. на тейлоровский аксиальный поток накладываются еще волны, перемещающиеся в горизонтальном направлении. Структура такого потока также ячеистая, но объем турбулентных пробок $M_{\text{турб}}$, естественно, еще выше. Наконец, в области А поток становится непериодическим и состоит из двух районов с ламинарным и турбулентным потоками и вращающейся спиральной турбулентной пробки, границы которых перемещаются случайным образом. Переходы между областями Б \leftrightarrow В \leftrightarrow Г \leftrightarrow Д называются переходами спектральной эволюции и носят эволю-

ционный характер. Переходы типа Б \leftrightarrow А являются катастрофическими и носят взрывной, непредсказуемый “квантовый” характер: в определенный момент точка $\text{Re}_i(\text{Re}_o)$ просто переходит из области Б в область А или наоборот, а границы этих областей асимптотически сближаются. Также квантовый характер носят и переходы между областями В и Г при больших Re_o .

Таким образом, при больших Re_o и не очень больших Re_i мы попадаем в крайне неустойчивую, сильно неравновесную разупорядоченную область потока красителя, причем степень неравновесности еще больше возрастает при стремлении Re_o к 0. При этом граница между областями Б и А при стремлении Re_o к $+\infty$ все более размывается, что дает основу для поиска возможных резонансов режима потока красителя и лазерного излучения (фотон-турбонные квазирезонансы), при которых поток раствора красителя через зону генерации может, напротив, стабилизироваться, а его ламинарная и турбулентная части достаточно строго локализоваться. Как показал модельный расчет [11], при $\text{Re}_i \rightarrow 0$ и $\text{Re}_o \rightarrow 2 \times 10^4$ турбулентная часть потока локализуется в малой зоне вблизи центра кюветы с красителем, а основная масса потока при этом остается чисто ламинарной. При переходе же точки $(\text{Re}_i \approx 0, \text{Re}_o \approx 2 \times 10^4)$ соотношение $M_{\text{турб}}(M_{\text{лам}})$ потока меняется на диаметрально противоположное.

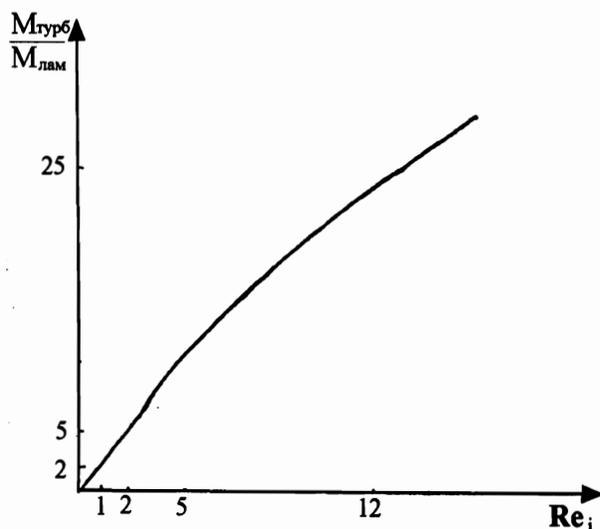


Рис. 3. Зависимость соотношения турбулентной и ламинарной фракций потока красителя от числа Рейнольдса Re_i

На практике это означает, что при условии работы в окне $(\text{Re}_i \approx 0, \text{Re}_o \approx 2 \times 10^4)$ можно более, чем в 20 раз [13] повысить максимальное значение верхней границы скорости потока красителя

по сравнению с классическим случаем [9], что позволяет существенно повысить частоту следования и эффективность генерации импульсно-го лазера на красителях.

Кроме описанной выше гидродинамической турбулентности потока красителя, возможна и фототермодинамическая его турбулентность. Она возникает вследствие того, что под действием импульса излучения накачки мгновенная температура рабочей жидкой активной среды в зоне генерации за время действия импульса $\sim 10^{-6}$ с достигает больших значений $T \sim 1000-2000^\circ\text{K}$ [14], а в других участках активной среды остается практически при комнатной температуре. При этом возникают большие тепловые градиенты и интенсивный фотоконвективный поток красителя, который при определенных условиях может перейти в турбулентный режим. В то же время для обеспечения высокоскоростной фотоконвективной смены молекул красителя в объеме зоны генерации желательнее, чтобы скорость фотоконвекции была бы максимальной.

Для описания процесса переноса тепла необходимо совместное решение трехмерных уравнений теплопроводности и термодиффузии с граничными условиями $T(\infty, t) = T_0$, $T(0, t) = T_{\text{max}}$ и начальными условиями $T(r, 0) = T(r, \infty) = T_0$. Здесь $T(r, t) = T(x, y, t)$ – температура раствора красителя в точке $r = (x, y)$ в момент времени t , а T_0 – температура окружающей среды. Решение этой системы уравнений вследствие сильной нелинейности и нестационарности задачи достаточно нетривиально, а его результатом является [14]:

$$T(x, y, t) = \frac{P_0(1-R^*)}{4c^* \rho (\sqrt{\pi\chi})^3} \times \sum_{n=1}^{N^*} \int_{t-\frac{n-1}{fc}}^{t-\frac{n}{fc}} \left(\frac{d\tau}{(t_0 + \tau)\sqrt{\tau}} e^{\frac{[x+v(t_0+\tau)]^2}{4\chi(t_0+\tau)}} \right) \times \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left[e^{\frac{(y-2m l_{32}-R)^2}{4\chi(t_0+\tau)}} + e^{\frac{(y+2m l_{32}+R)^2}{4\chi(t_0+\tau)}} \right], \quad (6)$$

где τ 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 – удельные теплоемкость, плотность и температуропроводность раствора красителя; $\chi = \kappa / c^* \rho$, κ – коэффициент его теплопроводности, а c – скорость света в вакууме.

При определенных условиях, задаваемых параметрами импульса излучения накачки и ха-

рактеристиками потока смеси растворов красителей, можно вывести следующие закономерности.

Если интенсивность излучения накачки

$$I_0 = \frac{4P_0}{\pi d_{32}^2} \quad (7)$$

будет меньше некоторой критической величины

$$I_{0c} = D \frac{\rho c^* \eta^2}{(\sigma_a N_m) g \beta r^*{}^3 \tau}, \quad (8)$$

где σ_a – оптическое сечение поглощения излучения накачки на длине волны λ_n , β – объемный коэффициент теплового расширения раствора красителя, r^* – место расположения зоны генерации внутри кюветы с красителем относительно ее центра, g – ускорение свободного падения, $D < 1$ – численная константа, то возникающий фотоконвективный поток красителя в турбулентный режим не перейдет.

С другой стороны, если число Рэлея

$$Ra = \frac{(\sigma_a N_m) I g \beta r^*{}^5}{k \chi \eta} \quad (9)$$

будет больше некоторого критического значения

$$Ra_c = \frac{g^{2\beta} r^*{}^4}{c \chi \eta}, \quad (10)$$

то внутри кюветы будет происходить интенсивный фотоконвективное термоиндуцированное перемешивание красителя со скоростью

$$u_{conv} = D \left(\frac{\eta^2}{\tau r} \right)^{1/3}, \quad (11)$$

достаточной для быстрой смены дезактивированных молекул красителя.

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 лазерной генерации становится малой. При этом скорость потока красителя будет достаточной для стабильной замены рабочего набора молекул красителя в промежутке между импульсами накачки. В то же время сам этот поток в зоне генерации будет чисто ламинарным, а скорость фотоиндуцированного конвективного потока

красителя через зону генерации внутри кюветы с красителем будет достаточной для перемешивания молекул красителя. При этом дезактивированные молекулы красителя к моменту их поступления в зону генерации, согласованному с моментом поступления туда импульса излучения накачки, успеют восстановиться, а выполнение условий (1) и (4) обеспечит исключение стробоскопического эффекта и согласование констант фотохимических реакций, возникающих в процессе лазерной генерации.

Благодаря этому, несмотря на сильную неравновесность системы "поток активной среды (жидкий раствор красителя) – импульсное излучение накачки – резонатор", и, соответственно, сильную нестационарность и нелинейность задачи, удается обеспечить выполнение условий стационарной генерации жидкостного лазера на красителях, причем степень неравновесности оказывается даже существенно меньшей, чем в обычных условиях. Это позволяет более, чем в 20 раз по сравнению с известными аналогами [4-9] повысить частоту следования и мощность импульсов излучения генерации лазера на красителях, их стабильность, а, следовательно, к.п.д. и эффективность генерации этого лазера.

По данной методике был проведен модельный расчет для условий данной задачи (λ 504 нм, $P \sim 10^5$ Вт, $\tau \sim 10^{-6}$ нс, $\Delta\varphi \sim 10^{-3}$ рад, $f \rightarrow \infty$) [13]. Разработана конструкция активного элемента [15], обеспечивающая полное исключение турбулентности потока красителя и стробоскопического эффекта и согласование констант фотохимических реакций в диапазоне скоростей 1.2×10^{-7} -1300 л/с, что соответствует частоте следования импульсов генерации лазера 10^7 -533 Гц, что более, чем в 20 раз превышает типовые значения частоты у известных аналогов [4-11]. Это позволило полностью исключить внешнюю систему прокачки, что сделало прибор намного более компактным и экономичным (расход красителя уменьшился с 1-10 л/год до 3×10^{-3} л/год, что при средних ценах на него ~ 1000 -5000 \$/л составляет экономию до 50000 \$/год).

В качестве излучения накачки использовалась 3-я гармоника стабилизированного импульсного твердотельного неодимового лазера с λ 353 нм, $P_0 = 10^6$ Вт, $\tau = 1$ мкс и $f = 500$ Гц [16-17].

В качестве активной среды использовались смеси растворов кумаринов -170 и -47 в этиленгликоле в соотношениях C170/EG = 0.3×10^5 моль/л, C47/EG = 1×10^{-5} моль/л и C170/C47 = 1:3, а в качестве резонатора лазера — высокодобротный дисперсионный двухпризменный оптический резонатор (аналог резонатора серийного отечественного лазера ЛЖИ-502) с встроенным внутриврезонаторным узкополосным интерференционным светофильтром, в ко-

тором все оптические элементы были выполнены из кварца с многослойным защитным покрытием и имели повышенную лучевую стойкость. Система формирования, фокусировки и транспортировки выходного излучения разработанного жидкостного импульсного лазера на красителях в рабочую операционную зону представляла собой кварцевую фокусирующую линзу и кварцевый оптический световод с фоконом на одном конце и фокусирующей сферической микролинзой на другом.

Такой лазер (рис.1) был сконструирован, изготовлен и испытан в работе и показал хорошие эксплуатационные характеристики (компактность, вибростойкость, малые энергопотребление и расход красителя, относительно низкая стоимость и высокая экономичность). Исследования режимов его работы [13] показали высокую стабильность и существенное повышение эффективности генерации по сравнению с известными аналогами.

Высокие генерационные характеристики этого лазера ($P \geq 10^5$ Вт, $\tau \sim 10^{-6}$ с, $\Delta\varphi \sim 10^{-3}$ рад, λ 504 нм, $f_c = 0$ -533 Гц) открывают хорошие перспективы его использования, в частности, в медицине — например, для дистанционной импульсной лазерной шокотрипсии уратов и кальциевых при лечении мочекаменной и желчнокаменной болезней в практической урологии. Последующие модификации данного лазера, очевидно, допускают возможность плавной перестройки длины волны его выходного излучения в спектральном диапазоне λ 266-1100 нм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Anderson S.G. //Laser Fokus World. 1998. N1. P.78-100.
2. Anderson S.G. //Laser Fokus World. 1998. N2. P.72-95.
3. Watson G.M., Wickham J.E.A. //World Journal of Urology. 1989. N7. P.147-150.
4. Справочник по лазерам. Т.1. Ред. А.М. Прохорова. 1973. М. Сов. Радио. 504с.
5. Lambda Physik Lasertechnik GmbH. Product List'98. Goettingen, Deitchland. Lambda Physik. 1998. 38 p.
6. Батище С.А., Мостовников В.А., Тарковский В.В. //Кв. электроника (Москва). 1995. Т.22, N7. С.651-652.
7. Батище С.А., Мостовников В.А., Тарковский В.В. //Кв. электроника (Москва). 1995. Т.22, N7. С.751-752.
8. Laser Science Inc. Product List'98. Franklin, Massachusetts, USA. Laser Science Inc. 1998. 22 p.
9. Тех. описание лазера ЛЖИ-502. 1981. М. Изд-во НПО "Зенит". 68 с.
10. "Karl Zeiss Iena" //Патент США N4328468. МКИ H01S 3/082. 1982.

11. *Moeller W., von Schwuchow H.-P.*//Патент PCT N85104990. МКИ H01S 3/103, 3/102. 1985.
12. *Donnelly R.J.*//Phys. Today. 1992. V.11. P.320-329.
13. *Весничева Г.А., Иванов А.Ю.*//ЖТФ. 1994. Т.64, N1. С.201-205.
14. *Аникиев Ю.Г., Жаботинский М.Е., Кравченко В.Б.* Лазеры на неорганических жидкостях. 1986. М. Наука. 423 с.
15. *Весничева Г.А., Иванов А.Ю., Скоков И.В.* //А.С. СССР N1739424. МКИ H01S 3/02. 1992.
16. Pulsolith. Service Manual. Paris, France. Technomed Intern. 1989. 177 p.
17. LUXUS 250. Nd: YAG Surgical Laser System. Service Manual. Milpitas, California, USA. Laser Sonics Heraeus Surgical Inc. 1987. 169 p.

INVESTIGATION OF THE GENERATION MODE EFFICIENCY OF A COMPACT POWERFUL PULSED TUNABLE LIQUID DYE LASER

A.Yu. Ivanov

Institute for Analytical Instrumentation RAS, St.Peterburg

The efficiency of the generation modes of a compact pulsed powerful tunable dye laser is investigated in this work. As a result of theoretical calculations made using the technique developed in this work a "quasiequilibrium window" of the dye laser generation process was determined, which exhibits a significant growth of the generation efficiency. An original laboratory prototype of the new compact powerful pulsed tunable dye laser was investigated, constructed and manufactured. It is equipped with a fiber-optical system for spatial forming, focusing and transporting of the laser beam into the operating zone. A working active dye mixture was calculated and investigated, that made it possible to obtain high generation characteristics at an "exotic" wavelength of $\lambda=504$ nm, that is needed for laser shock lithotripsy of urates and calcites in practical urology. The laser developed was tested and showed good generation and operation characteristics. Possible practical applications of the laser are discussed.