

07

## **Эффективный режим лазерной генерации смеси органических красителей на длинах волн 610 и 670 nm**

© А.Ю. Иванов

Институт аналитического приборостроения, С.-Петербург

*Поступило в Редакцию 12 октября 1998 г.*

Проведено исследование эффективности режима генерации импульсного перестраиваемого лазера на "экзотических" длинах волн 610 и 670 nm, необходимых в ядерной физике. Разработана методика модельного расчета активных сред такого лазера — рабочих смесей высокомолекулярных органических красителей. Выведены условия, определяющие окно квазиравновесности, в котором возможно достижение высоких генерационных характеристик такой смеси на заданных длинах волн. Это интерпретируется на основании закона чередования неравновесностей теории неравновесных состояний. Полученные результаты проверены экспериментально: создан мощный малогабаритный импульсный лазер на смеси растворов красителей, обладающий высокими генерационными свойствами на заданных длинах волн 610 и 670 nm. Обсуждаются возможные практические применения обнаруженного эффекта.

Одним из возможных типов лазеров, широко используемых в повседневной практике, являются перестраиваемые лазеры на красителях. Как отмечается в новейшем обзоре мирового рынка лазерных технологий [1], 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 ( $\lambda = 0.26\text{--}1.1\ \mu\text{m}$ ). 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.

Например, в ядерной физике одной из важнейших перспективных задач является измерение числа и исследование характеристик короткоживущих ядер радиоактивного изотопа  ${}^3\text{Li}_{11}$ . Исходя из этой информации, можно сделать вывод об утечках и степени работоспособности промышленных и исследовательских ядерных реакторов. Обычно такие исследования проводятся по методике многофотонной резонансной лазерной ионизационной спектроскопии, разработанной В.С.Летоховым с сотрудниками [2]. Для исследования  ${}^3\text{Li}_{11}$  по этой методике требуются 3 мощных лазерных пучка с высокими генерационными характеристиками на длинах волн  $\lambda_1 = 510\text{--}580\ \text{nm}$ ,  $\lambda_2 = 610$  и  $\lambda_3 = 670\ \text{nm}$ , очень жестко синхронизованных в пространстве (с точностью до  $1\ \mu\text{m}$ ) и времени (с точностью до  $1\ \text{ns}$ ). Если первый из этих пучков достаточно легко получить, например, от газового лазера на парах  $\text{Cu}^+$  ( $\lambda 510$  и  $\lambda 578\ \text{nm}$ ) или от 2-й гармоники твердотельного лазера на  $\text{Nd}^{3+}\text{-YAG}$  ( $\lambda 532\ \text{nm}$ ), то получение 2-го и 3-го рабочих пучков света представляет собой сложную задачу. Их может дать только импульсный перестраиваемый лазер на красителях.

При этом анализ генерационных характеристик известных органических красителей [3] показал, что эти длины волн, к сожалению, попадают на "хвосты" кривых генерации наиболее широко используемых красителей. Поэтому создание мощного лазера с высокими генерационными характеристиками на длинах волн  $\lambda 610$  и  $\lambda 670\ \text{nm}$

является достаточно сложной задачей. Следовательно, помимо того, что для решения поставленной задачи требуется "экзотический" лазер с высокими генерационными характеристиками, необходимо еще и чтобы он работал в некоем "экзотическом" режиме на какой-то "экзотической" активной среде.

В работе [4] дан развернутый совместный анализ динамики режимов генерации, фотохимической дезактивации и восстановления молекул красителя и его лазерной накачки. Отмечается, что при определенных условиях в исследуемом режиме при сильной степени неравновесности системы "поток красителя–излучение накачки–резонатор" возможно обеспечение условий стационарной генерации жидкостного лазера на красителях, причем степень неравновесности системы в обнаруженном окне квазиравновесности [5] оказывается значительно меньшей, чем в обычных условиях. Это позволяет существенно повысить генерационные характеристики лазера. На основе обнаруженного эффекта был сконструирован оригинальный активный элемент лазера на красителях [6], который показал хорошие генерационные и эксплуатационные характеристики. Для создания "экзотической" активной среды можно использовать смеси растворов различных красителей различной концентрации [7]. Рассмотрим условия и методику расчета и приготовления таких смесей.

Во-первых, красители, используемые в качестве ингредиентов такой рабочей смеси, должны быть химически совместимы. Обычно в качестве активной лазерной среды используются сложные высокомолекулярные биополимеры с большим молекулярным весом (родамины, оксазины, кумарины, оксадиазолы, фениламины и пр.), но могут быть и относительно простые кислоты (например, аминокислоты), и соли (например, нитраты щелочных и щелочно-земельных металлов, цветные бриллианты, сульфофлавины и пр.). Для упрощения задачи рассчитаем генерационные характеристики смеси 2 биополимеров с молекулярным весом  $N_m^{1,2}$ , плотностью  $\rho_{1,2}$  и кинематической вязкостью  $\eta_{1,2}$ . Пусть они будут химически совместимы, т. е. химически нейтральны по отношению друг к другу и используемым растворителям. В качестве последних возьмем какой-нибудь один простой растворитель, например этанол высокой степени очистки  $C_2H_5OH$ .

Во-вторых, эти 2 красителя должны быть "спектроскопически" совместимы, т. е. достаточно легко возбуждаться излучением накачки (например, от медного ( $\lambda 510$  или  $\lambda 578$  nm) или от 2-й гармоники

неодимового лазеров ( $\lambda 532 \text{ nm}$ )), что означает близость максимумов полос поглощения  $\lambda_{1a}^m$ ,  $\lambda_{2a}^m$  при высоких сечениях поглощения  $\sigma_{1a}$  и  $\sigma_{2a}$  на длине волны излучения накачки. При этом желательно, чтобы требуемая длина волны генерации смеси приходилась бы на "красный хвост" кривой генерации первого ее ингредиента и на "синий хвост" кривой генерации второго, а квантовые эффективности генерации возможных компонентов смеси  $j_f^{1,2}$  в заданном спектральном диапазоне были бы достаточно велики.

При соблюдении этих двух условий полученная рабочая смесь растворов двух красителей в этаноле должна в результате межмолекулярных взаимодействий эффективно генерировать излучение на заданной длине волны. Анализ литературы [3,8–10] показал, что на длине волны  $\lambda 610 \text{ nm}$  могут "заработать" смеси родаминов 6G и 4C перхлората (R6G и R4CP) или сафранина T(ST) с синей стороны спектра и фениламинов — 166 и 439 (FA166 и FA439) с красной стороны. Для длины волны  $\lambda 670 \text{ nm}$  "синими" компонентами смеси могут быть те же FA166 и FA439 (FA166 и FA439), обладающие высокой эффективностью генерации  $j_f$  в этом спектральном диапазоне, а в качестве "красных" составляющих рабочей смеси разумно использовать либо оксазин-1 перхлорат (O1P), либо изомеры нильского синего А и В (NA и NB).

Кроме того, как уже отмечалось выше, в условиях сильной неравновесности системы "поток красителя–излучение накачки–резонатор" в обнаруженном окне квазиравновесности возможно обеспечить условия стабильной стационарной генерации лазера на красителях. Одним из этих условий в конструкции описанной в [6], является согласование динамики накачки и прокачки смеси наших красителей с динамикой их фотодезактивации и восстановления при исключении стробоскопического эффекта. Для этого угловая скорость вращения кюветы  $w$  со смесью красителей в активном элементе жидкостного лазера должна лежать в рамках окна.

$$w \in \left[ \frac{10r}{\pi \varnothing_g^2 l_g} \frac{1}{N_a N_m} \xi N_{ph}, \frac{2\pi r}{\varnothing_g^2 \tau_{red}} \right]^2, \quad (1)$$

где  $r$ ,  $\varnothing_g$  и  $l_g$  — радиус кюветы с красителем, диаметр и длина зоны генерации в ней,  $N_a$  и  $N_{ph}$  — число Авогадро и число фотонов в импульсе излучения накачки, а  $\xi$  и  $\tau_{red}$  — эффективность фотодезактивации и восстановления рабочих молекул красителя под действием импульса из-

лучения накачки. Отсюда видно, что молекулярный вес, эффективность фотодезактивации и время восстановления обоих компонентов рабочей смеси  $\{N_m, \xi, \tau_{red}\}^{1,2}$  должны удовлетворять условию (1).

Другим условием получения эффективности режима генерации лазера на красителях является ламинарность потока красителя в данной конструкции, являющегося частным случаем потока Куэтта [11]. Для этого число Рейнольдса этого потока  $Re$  должно лежать в пределах окна

$$R_e = \frac{wr^2}{\eta} \in [0, \bar{2} \cdot 10^4], \quad (2)$$

откуда вытекает условие согласования кинематических вязкостей компонентов смеси  $\{\eta\}^{1,2}$ .

Наконец, по [4] необходимо, чтобы, с одной стороны фототермодинамические флуктуации потока рабочей смеси красителей, возникающие под действием импульса излучения накачки, также лежали бы в рамках определенного "окна квазиравновесности", а с другой стороны, возникающая при этом фотоконвекция потока красителя обеспечивала бы достаточно интенсивную смену дезактивированных молекул обоих компонентов смеси. Для этого необходимо, чтобы интенсивность импульса излучения накачки  $I_0$  и число Рэлея  $Ra$  не превышали бы определенных критических величин:

$$\begin{cases} I_0 = \frac{4P_0}{\pi \varnothing_g} < I_{0c}^{1,2} = \left( D \frac{\rho c \eta^2}{(\sigma_a N_m) g \beta r^3 \tau_0} \right)^{1,2}, \\ Ra^{1,2} = \left( \frac{(\sigma_a N_m) I_0 g \beta r^5}{\kappa \chi \eta} \right)^{1,2} < Ra_c^{1,2} = \left( \frac{g^2 \beta r^4}{c \chi \eta} \right)^{1,2}, \\ D_{1,2} \cong 1; \quad g = 9.8 \frac{m}{c^2}. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь  $P_0$  и  $\tau_0$  — мощность и длительность импульса излучения накачки,  $c_{1,2}$  и  $\beta_{1,2}$  — удельные теплоемкости и коэффициенты объемного расширения компонентов рабочей смеси, а  $\kappa_{1,2}$  и  $\chi_{1,2}$  — коэффициенты их тепло- и температуропроводности. Условия (3) накладывают еще и определенные требования на величины  $\{c, \beta, \kappa$  и  $\chi\}$  обоих компонентов рабочей смеси.

Таким образом, при увеличении степени неравновесности системы "излучение накачки — поток рабочей смеси красителей — резонатор" при приближении к некоторой границе качества  $\lambda \rightarrow \lambda_s$ ,  $\tau \rightarrow \tau_s$  и  $\varepsilon \rightarrow \varepsilon_s$  структура рабочей смеси красителей изменяется. При этом динамика генерации этой смеси становится аномальной, что позволяет в некотором окне квазиравновесности [5], определяемом физико-химическими характеристиками рабочих компонентов смеси  $\{c, \rho, \chi, \kappa, \eta, \beta, \xi, \tau_{red}, c, \lambda_a, \lambda_f, \sigma_a, j_f\}^{1,2}$ , характеристиками потока этой смеси и конструкции лазера  $\{w, r, \varnothing_g \text{ и } l_g\}$ , а также параметрами излучения накачки  $\{P_0, \tau_0\}$ , достичь высоких генерационных характеристик "экзотической" смеси красителей, являющейся активным рабочим веществом "экзотического" жидкостного лазера, работающего в "экзотическом" режиме. Это позволяет решить поставленную задачу и получить мощные пучки лазерного излучения на "экзотических" длинах волн  $\lambda 610$  и  $\lambda 670 \text{ nm}$  с хорошими параметрами, необходимые для измерения числа и исследования характеристик короткоживущих ядер изотопа  ${}^3\text{Li}_{11}$ , которые важны для ядерной физики. Эта задача успешно решена экспериментально при накачке излучением лазера на парах меди с  $\lambda 510$  и  $\lambda 578 \text{ nm}$ .

Таким образом, получено экспериментальное подтверждение закона чередования неравновесностей [5], что позволило получить важный экспериментальный результат. Вероятнее всего, по данной методике возможно рассчитывать и получать и другие "экзотические" длины волн лазерной генерации с высокими характеристиками, необходимые для решения конкретных практических задач.

## Список литературы

- [1] *Anderson S.G.* // *Laser Fokus World*. 1997. N 1. P. 73–92; N 2. P. 84–107.
- [2] *Летохов В.С.* Нелинейные селективные фотопроцессы в атомах и молекулах. М.: Наука, 1988. 408 с.
- [3] *Spectra Physics Prospect*, US, Cal., Mountain View. 1986. 42 p.; *Lambda Physics Prospect*, US, Ma., Acton, 1997. 26 p.
- [4] *Весничева Г.А., Иванов А.Ю.* // *ЖТФ*. 1994. Т. 64. № 1. С. 201–205.
- [5] *Скворцов Г.Е.* // *Письма в ЖТФ*. 1997. Т. 23. В. 10. С. 17–21.
- [6] *Весничева Г.А., Иванов А.Ю., Скоков И.В.* // *А.с. СССР № 1739424* МКИ H01S 3/02, приор. от 13.01.1989, опубл. 08.02.1992.
- [7] *Raymer M.G., Deng Z., Beck M.* // *JOSA B*. 1988. V. 5. N 8. P. 1588–1595.

- [8] *Справочник по лазерам. Т. 1 / Под ред. А.М. Прохорова, М.: Сов. радио, 1973. 504 с.*
- [9] *Аристов А.В., Шевандин В.С. // Опт. и спектр. 1977. Т. 43. № 2. С. 228–232.*
- [10] *Pavlopoulus T.G., Golich D.J. // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. N 2. P. 521–527, 560–565.*
- [11] *Donnelly R.J. // Phys. Today. 1992. V. 11, N 1. P. 320–339.*