

ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСИЛИТЕЛЯ ЛАЗЕРА НА КРАСИТЕЛЕ С НАКАЧКОЙ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЛАЗЕРОВ НА ПАРАХ МЕДИ (ПРОДОЛЬНЫЙ ВАРИАНТ ГЕОМЕТРИИ НАКАЧКИ)

Дьячков А.Б., Лабозин В.П.

РНИЦ "Курчатовский институт" Институт Молекулярной физики
123182, Москва, пл. Курчатова д.1
тел. (095) 196 76 60 факс (095) 194 19 94 e-mail: adjach@imp.kiae.ru



На основе решения скоростных уравнений процессов, происходящих в усилителе лазера на красителе (продольный вариант геометрии накачки), получено выражение для определения энергетического КПД преобразования излучения накачки в излучение генерации. В рассмотрение включен процесс поглощения излучения генерации из возбужденного состояния, который существенно влияет на эффективность усиления. Рассмотрены два варианта геометрии накачки: лучи генерации и накачки сонаправлены и противоположно направлены. Показано, что при больших коэффициентах усиления второй вариант геометрии накачки эффективнее.

Исходя из структуры энергетических уровней молекулы красителя и кинетики процессов, происходящих с молекулой красителя (Рис. 1), для случая, когда луч накачки и генерации сонаправлены (Рис. 2) можно написать систему скоростных уравнений (1-3).

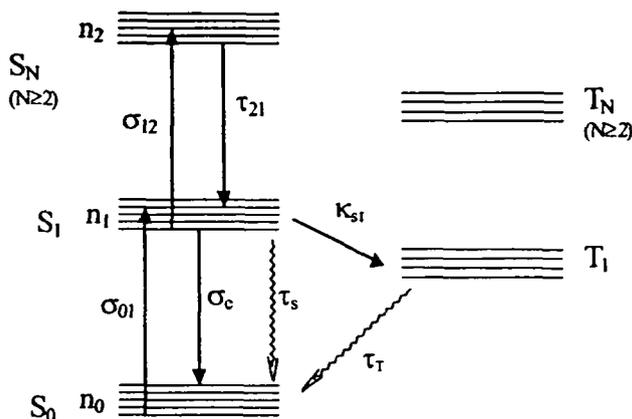


Рис. 1. Структура энергетических уровней красителя и кинетические процессы.

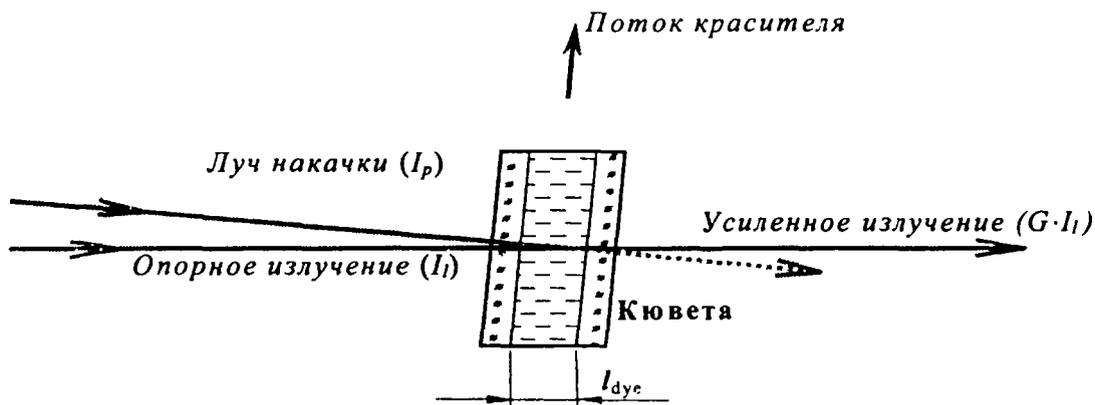


Рис. 2. Продольная геометрия накачки (луч накачки и генерации сонаправлены).

$$\frac{dn_1}{dt} = \sigma_{01}(\lambda_p)n_0I_p + \sigma_{01}(\lambda_l)n_0I_l - \frac{n_1}{\tau_s} - \sigma_e(\lambda_l)n_1I_l \quad (1)$$

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I_p(\lambda_p)}{\partial t} + \frac{\partial I_p(\lambda_p)}{\partial x} = -[\sigma_{01}(\lambda_p)n_0 + \sigma_{12}(\lambda_p)n_1]I_p(\lambda_p) \quad (2)$$

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I_l(\lambda_l)}{\partial t} + \frac{\partial I_l(\lambda_l)}{\partial x} = [\sigma_e(\lambda_l)n_1 - \sigma_{12}(\lambda_l)n_1]I_l(\lambda_l) \quad (3)$$

где

n_0, n_1 - плотность населенности основного S_0 и первого возбужденного S_1 синглетного состояния; σ_{01} , σ_{12} и σ_e - сечение поглощения из основного состояния, из возбужденного состояния и сечение вынужденного перехода соответственно, τ_s и τ_{1l} - время жизни в первом возбужденном состоянии и время безизлучательной релаксации. I_p и I_l - интенсивности накачки и излучения лазера на красителе, выраженные в (фотон/сексм²), λ_l - длина волны генерации, λ_p - длина волны излучения накачки.

В уравнениях (1 - 3) некоторые процессы были выведены из рассмотрения. Это допустимо сделать для случая, когда в качестве накачки используются лазеры на парах меди:

1. Изменение n_1 за счет синглет-триплетной $S_1 \rightarrow T_1$ конверсии пренебрежимо мало, так как длительность импульса накачки составляет 20 нс, что намного короче, чем постоянная времени интеркомбинационной конверсии в триплет T_1 $k_{st}^{-1} \sim 10^{-7}$ сек [1].

Так как между импульсами накачки 100 мксек (CVL работают при 10 кГц), это соответствует $1000\tau_T$ и, следовательно, заселением T_1 можно пренебречь.

2. Населенность верхнего возбужденного уровня n_2 была принята равной нулю, так как безизлучательный распад с уровней S_N ($N > 1$) к верхнему лазерному уровню S_1 происходит за времена порядка 10^{-12} сек, что намного быстрее τ_s (10^{-9} сек).

3. Из рассмотрения выведен процесс индуцированного съема инверсии излучением накачки $\sigma_e(\lambda_p) = 0$.

Так как импульс накачки в несколько раз длиннее всех быстрых релаксационных процессов (2-6 нс), а для большинства красителей поглощения из основного состояния на длине волны генерации пренебрежимо мало ($\sigma_{01}(\lambda_l) = 0$), можно перейти к решению следующей системы стационарных уравнений (4 - 6).

$$\sigma_{01}(\lambda_p)n_0I_p - \frac{n_1}{\tau_s} - \sigma_e(\lambda_l)n_1I_l = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial I_p(\lambda_p)}{\partial x} = -[\sigma_{01}(\lambda_p)n_0 + \sigma_{12}(\lambda_p)n_1]I_p(\lambda_p) \quad (5)$$

$$\frac{\partial I_l(\lambda_l)}{\partial x} = [\sigma_e(\lambda_l)n_1 - \sigma_{12}(\lambda_l)n_1]I_l(\lambda_l) \quad (6)$$

$$n = n_0 + n_1$$

n - плотность молекул красителя.

В результате решения системы была получена зависимость энергетической эффективности преобразования излучения накачки η от спектральных характеристик красителя и параметров накачки и усиления.

$$\eta = \frac{\lambda_p}{\lambda_l} \frac{(1 + \alpha)(G - 1)}{(G^{1+\alpha} - 1)} \left[1 - TG^\alpha - \frac{(G^\alpha - 1)}{\alpha \sigma_e(\lambda_l) \tau_s I_p(x=0)} \right] \quad (7)$$

где $\alpha = \frac{\sigma_{12}(\lambda_p)}{\sigma_e(\lambda_l)}$; T - пропускание излучения накачки в активной среде ($I_{p,вых}/I_{p,вх}$) в ходе усиления,

G - коэффициент усиления излучения лазера на красителе ($I_{l,вых}/I_{l,вх}$).

Для случая, когда луч накачки и генерации противоположно направлены (Рис. 3) решается система следующих стационарных уравнений (8-10):

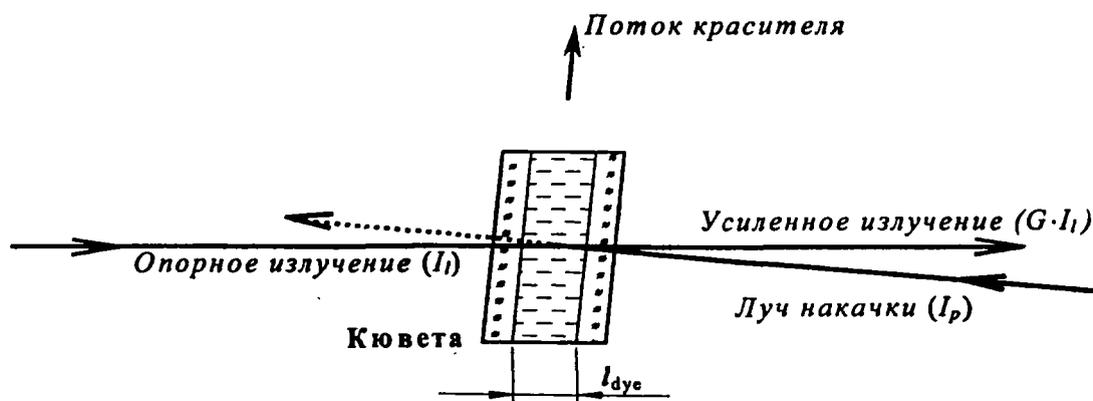


Рис. 3. Продольная геометрия накачки (луч накачки и генерации противоположно направлены)

$$\sigma_{01}(\lambda_p) n_0 I_p - \frac{n_l}{\tau_s} - \sigma_e(\lambda_l) n_l I_l = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial I_p(\lambda_p)}{\partial x} = [\sigma_{01}(\lambda_p) n_0 + \sigma_{12}(\lambda_p) n_l] I_p(\lambda_p) \quad (9)$$

$$\frac{\partial I_l(\lambda_l)}{\partial x} = [\sigma_e(\lambda_l) n_l - n_{12}(\lambda_l) n_l] I_l(\lambda_l) \quad (10)$$

В результате решения системы КПД усиления для случая, когда луч накачки идет навстречу усиливаемому излучению:

$$\eta = \frac{\lambda_p}{\lambda_l} \frac{1 - \alpha^*}{\beta} (G - 1) \left[1 - TG^{\alpha^*} - \frac{\gamma}{\alpha^*} \frac{(G^{\alpha^*} - 1)}{I_p(x = l_{дye})} \right] \quad (11)$$

$$\text{где } \alpha^* = \frac{\sigma_{12}(\lambda_p)}{\sigma_e(\lambda_l) - \sigma_{12}(\lambda_l)}; \quad \beta = \frac{\sigma_e(\lambda_l)}{\sigma_e(\lambda_l) - \sigma_{12}(\lambda_l)}; \quad \gamma = \frac{l}{(\sigma_e(\lambda_l) - \sigma_{12}(\lambda_l))\tau_s}$$

На Рис. 4 приведены расчетные зависимости КПД усилителя лазера на красителе в продольном варианте геометрии накачки для случая сонаправленных и противоположно направленных лучей накачки и генерации.

Оценим характеристики лазерного красителя Kiton Red (сульфородамин В). В работе [2] приведены все необходимые для расчета спектральными характеристиками данного красителя: $\lambda_p = 578$ нм, $\lambda_l = 590$ нм; $\sigma_{12}(\lambda_p) = 0,6 \times 10^{-16}$ см², $\sigma_{12}(\lambda_l) = 0,9 \times 10^{-16}$ см², $\sigma_e(\lambda_l) = 1,8 \times 10^{-16}$ см², $\tau_s = 5 \times 10^{-9}$ сек.

Для случая, когда лучи генерации и накачки противоположно направлены по формуле (11) можно определить предельные КПД красителя Kiton Red (Рис.5).

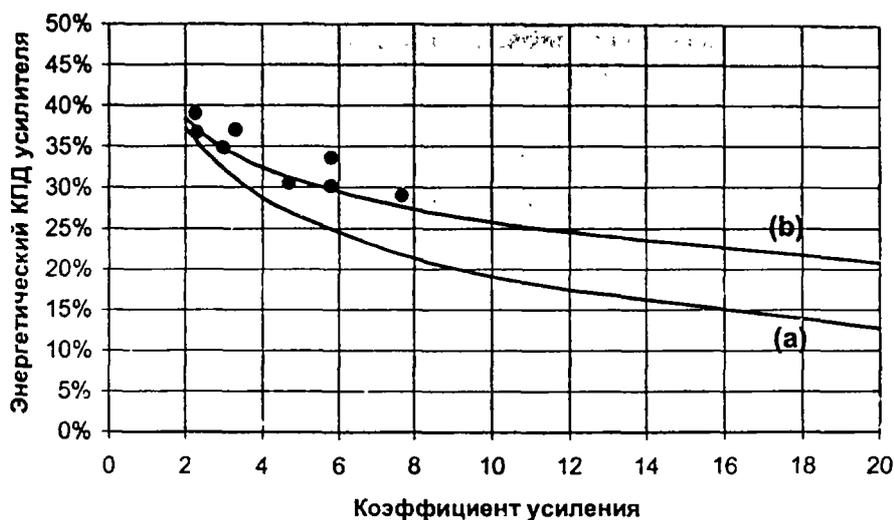


Рис. 4. Зависимость КПД усилителя лазера на красителе Rh 6G от коэффициента усиления.
 — — расчетная зависимость КПД ($\lambda_p = 510$ нм; $\lambda_l = 570$ нм; $\sigma_e(\lambda_l) = 1,9 \times 10^{-16} \text{ см}^{-2}$ [3]; $\tau_s = 4,8$ нс [3]; $\sigma_{l2}(\lambda_p) = 0,37 \times 10^{-16} \text{ см}^{-2}$ [4]; $\sigma_{l2}(\lambda_l) = 0,91 \times 10^{-16} \text{ см}^{-2}$ [5]; пропускание излучения накачки фиксировалось на уровне $T=0,025$, плотность мощности накачки 30 Вт/мм^2).
 а) луч генерации и накачки сонаправлены.
 б) луч генерации и накачки противоположно направлены.
 • - экспериментальные результаты: КПД усиления для Rh6G (лучи генерации и накачки противоположно направлены).

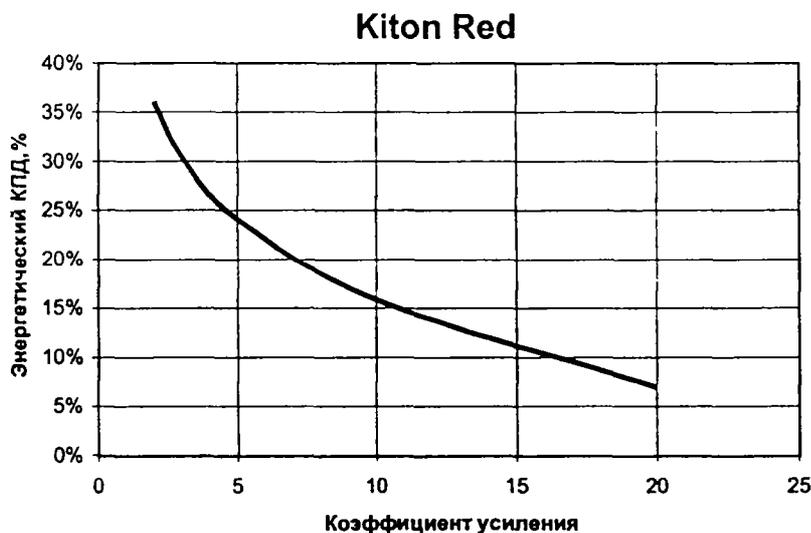


Рис. 5. КПД усиления красителя Kiton Red (продольный вариант геометрии накачки, лучи накачки и генерации противоположно направлены, плотность мощности излучения накачки 30 Вт/мм^2).

Из графика видно, что предельная эффективность усилителя на красителе Kiton Red (случай продольной геометрии накачки) ограничена значением 0,4 и достижима только при очень низких коэффициентах усиления < 2 . При больших коэффициентах усиления КПД резко падает. В работе [2] приводится значение $\eta = 0,4$ (пл/пл. неселективный резонатор, продольная геометрия накачки CVL), в работе [6] $\eta = 0,18$ (поперечная накачка CVL).

Основная причина такого поведения лазерного красителя Kiton Red заключена в относительно большой вероятности процессов поглощения из возбужденного состояния на длине волны генерации и накачки по сравнению с вероятностью индуцированного перехода.

Существенно другое соотношение между вероятностями процессов поглощения из возбужденного состояния и индуцированного перехода у красителя Pyromethene 567, имеющего следующие спектральные характеристики: при $\lambda_p = 510$ нм, $\lambda_l = 550$ нм, $\sigma_{12}(\lambda_p) = 0,26 \times 10^{-16}$ см² (измерены по методике, описанной в [7]), $\sigma_{12}(\lambda_l) = 0,3 \times 10^{-16}$ см² (литературные данные для $\lambda_p = 510$ нм не найдены, $\sigma_{12}(\lambda_l)$ взято равным $\sigma_{12}(\lambda_p)$, исходя из пологой спектральной зависимости поглощения PM-567 из основного состояния непосредственно в S₂ (каталог фирмы Lambdachrome)), $\sigma_e(\lambda_l) = 2,4 \times 10^{-16}$ см² [8], $\tau = 6,7 \times 10^{-9}$ сек [9].

На Рис. 6 приведена расчетная зависимость и экспериментальные точки КПД усиления PM-567 от коэффициента усиления на длине волны $\lambda_l = 575$ нм в предположении, что $\sigma_e(\lambda_l) = 1,4 \times 10^{-16}$ см² (спектр генерации PM-567 показывает, что эффективность генерации на длине волны 575 нм составляет 0,6 от максимума на длине волны 550 нм).

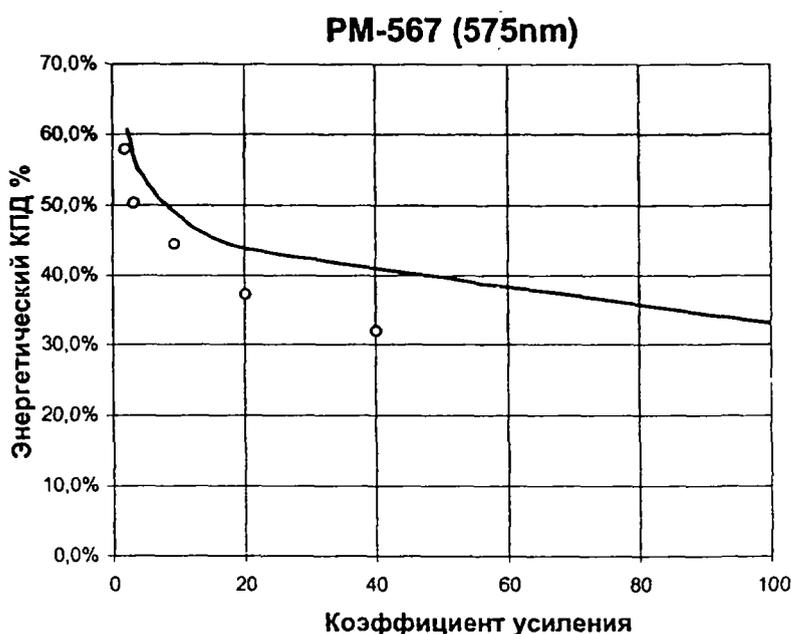


Рис. 6. Расчетная зависимость и экспериментальные точки КПД усиления PM-567 от коэффициента усиления на $\lambda_l = 575$ нм.

Нами экспериментально установлено, что красители: Pyromethene 580, Pyromethene 567, Pyromethene 597, Rhodamine 101, Sulforhodamine 101 позволяют преобразовывать излучение накачки медных лазеров в продольном варианте с эффективностями 50-70% в спектральном диапазоне 535 – 625 нм.

Литература.

1. B.V.Snavely Proc.IEEE, 57, 1374 (1969).
2. W.Sum, C.S.Tang Optics Communications, 58, n.3, p.1986
3. O.G.Peterson J.Appl.Phys, 42, 1917 (1971).
4. P.R.Hammond IEEE, QE-15, 624 (1979).
5. S.Speiser Appl.Phys. B 38, 191 (1985)
6. R.S.Hargrove, T.Kan. IEEE, QE-16, n.10, (1980)
7. P.R.Hammond Appl.Optics. 18, n.4, (1979)
8. М.В.Бондар, О.В.Пржонская "Квантовая электроника", 25, n.9 (1998)
9. M.P.O'Neil Optics Letts., 18, 37 (1993)