

Генерация одиночных пикосекундных импульсов в лазере с распределенной обратной связью на бинарной смеси красителей при наносекундном возбуждении

Е.А.Ермилов, И.М.Гулис

Предложен и экспериментально реализован новый метод генерации стабильных одиночных перестраиваемых по частоте пикосекундных импульсов в лазере с распределенной обратной связью на двухкомпонентной смеси органических красителей при накачке импульсами наносекундной длительности с энергиями, значительно превышающими пороговый уровень возбуждения.

Ключевые слова: *распределенная обратная связь, органические красители, одиночные пикосекундные импульсы, спектральное переключение.*

Одним из наиболее простых способов получения УКИ в лазерах на красителях (ЛК) является пассивная модуляция добротности (ПМД), не требующая использования дополнительных внешних устройств управления [1]. Особый интерес с практической точки зрения представляет режим работы, при котором генерируется одиночный спектрально-перестраиваемый пикосекундный импульс при накачке лазерной системы импульсами наносекундной длительности с энергией, значительно превышающей пороговую энергию возбуждения, что должно приводить к заметному снижению влияния флуктуаций накачки на генерационные характеристики ЛК.

Анализ показывает, что в силу ряда осложняющих обстоятельств обычный режим ПМД не является радикальным решением проблемы получения стабильных одиночных пикосекундных импульсов в таких лазерах [2], а использование синхронизации мод [3, 4] или работа в режиме релаксационных колебаний и гашение нежелательных последующих импульсов [5, 6] сложны в реализации. Вследствие этого актуальной является разработка новых режимов генерации в ЛК, позволяющих получать перестраиваемые по частоте и стабильные по энергии и длительности одиночные пикосекундные импульсы в широком диапазоне интенсивностей накачки импульсами недорогих источников наносекундной длительности, характеризующихся конструктивной простотой, что должно обеспечить им широкую область практических приложений.

Рассмотрим лазер с динамической распределенной обратной связью (РОС) активная среда (АС) которого состоит из раствора двух красителей; один из них выполняет функции генерационной среды (ГС), второй – насыщающегося поглотителя (НП). Известно, что в РОС-лазере, в отличие от системы с зеркальным резонатором, реализуется самомодуляция добротности (время жизни фотонов в резонаторе, а значит, и его доброт-

ность резко уменьшаются в момент излучения импульса генерации) [7–9].

Поскольку спектр усиления органических красителей достаточно широк (20–50 нм), а длина волны генерации РОС-лазера жестко задается углами падения интерферирующих пучков накачки на АС [10], то можно создать условия, при которых генерация происходит в двух спектральных областях. Одна из этих областей соответствует длине волны, задаваемой РОС-структурой, а вторая определяется спектральной настройкой селективного внешнего резонатора. Добротность внешнего резонатора можно подобрать такой, чтобы при наличии в двухкомпонентной АС непросветленного НП генерация при заданной энергии импульса накачки не развивалась.

Под действием возбуждающего излучения в ГС формируется решетка населенности, и при достижении порога генерации происходит излучение пикосекундного импульса на длине волны, определяемой РОС; одновременно с этим НП просветляется и населенность его основного состояния уменьшается практически до нуля. Инверсная населенность ГС также уменьшается, что приводит к резкому сокращению времени жизни фотонов в резонаторе, образованном РОС. При использовании НП с большим временем жизни возбужденного состояния (порядка нескольких наносекунд) он остается просветленным после первого импульса генерации на РОС-структуре в течение времени, достаточного для того, чтобы за счет продолжающейся накачки был достигнут порог генерации в ГС во внешнем резонаторе.

Поскольку при просветленном НП порог достигается при относительно низкой инверсной населенности ГС, недостаточной для формирования эффективной РОС, генерация последующих импульсов будет происходить на длине волны, определяемой внешней обратной связью. В итоге РОС-лазер будет работать в режиме переключения генерации с длины волны, задаваемой РОС-структурой (первый импульс), на длину волны, задаваемую внешним спектрально-отстроенным резонатором (последующие импульсы). Роль НП в таком режиме заключается в реализации возможности генерации на РОС-структуре при больших пороговых инверсных населенностях ГС. Таким образом, следует ожидать, что в РОС-лазере на

бинарной смеси органических красителей в режиме спектрального переключения возможна генерация одностороннего пикосекундного импульса на длине волны, определяемой РОС, при накачке импульсами наносекундной длительности с энергиями, существенно превышающими пороговую энергию возбуждения.

Расчет генерационных характеристик для предлагаемого режима спектрального переключения РОС-лазера с двухкомпонентной АС будем проводить на основе скоростных уравнений для пространственно-усредненных параметров [1, 2, 11]:

$$\frac{dn}{dt} = I_p \sigma_p (N - n) - \frac{\sigma_{e1} c}{\eta} n q_1 - \frac{\sigma_{e2} c}{\eta} n q_2 + \frac{\sigma_{a1} c}{\eta} (N - n) q_1 + \frac{\sigma_{a2} c}{\eta} (N - n) q_2 - \frac{n}{\tau}, \quad (1)$$

$$\frac{dn_a}{dt} = \frac{N_a - n_a}{\tau_a} - I_p \sigma_{pa} n_a - \frac{\sigma_{1aa} c}{\eta} n_a q_1 - \frac{\sigma_{2aa} c}{\eta} n_a q_2 - k \sigma_{aa} \frac{n_a n}{\tau}, \quad (2)$$

$$\frac{dq_1}{dt} = \frac{\sigma_{e1} c}{\eta} n q_1 - \frac{q_1}{\tau_{c1}} + \Omega_1 \frac{n}{\tau} - \frac{\sigma_{1aa} c}{\eta} n_a q_1 - \frac{\sigma_{a1} c}{\eta} (N - n) q_1, \quad (3)$$

$$\frac{dq_2}{dt} = \frac{L}{L_2} \frac{\sigma_{e2} c}{\eta} n q_2 - \frac{q_2}{\tau_{c2}} + \Omega_2 \frac{n}{\tau} - \frac{L}{L_2} \frac{\sigma_{2aa} c}{\eta} n_a q_2 - \frac{L}{L_2} \frac{\sigma_{a2} c}{\eta} (N - n) q_2, \quad (4)$$

где n, n_a – плотности молекул ГС в возбужденном и НП в основном состояниях соответственно; N, N_a – плотности молекул ГС и НП; q_1, q_2 – плотности фотонов в ГС на длине волны, определяемой РОС (λ_1) и внешним спектрально-селективным резонатором (λ_2) соответственно; I_p – квантовая плотность мощности возбуждения; L – длина активной среды; η – показатель преломления раствора; τ, τ_a – времена жизни возбужденного состояния молекул ГС и НП; c – скорость света; σ_p, σ_{pa} – сечения поглощения ГС и НП на длине волны возбуждающего излучения; σ_{e1}, σ_{e2} – сечения генерации ГС на длине волны λ_1 и λ_2 ; σ_{a1}, σ_{a2} – сечения поглощения ГС на длине волны λ_1 и λ_2 ; $\sigma_{1aa}, \sigma_{2aa}$ – сечения поглощения НП на длине волны λ_1 и λ_2 ; σ_{aa} – среднее сечение поглощения НП; k – параметр, учитывающий заселение возбужденного состояния НП за счет безызлучательного переноса энергии с ГС и перепоглощения люминесцентного излучения ГС; Ω_1, Ω_2 – спектрально-пространственный фактор, определяющий долю люминесценции ГС, которая попадает в соответствующие спектральные и пространственные области генерации;

$$\tau_{c1} = \max \left[\frac{\eta L^3}{8\pi^2 c} (\sigma_{e1} n V)^2, \frac{\eta L}{10c} \right], \quad (5)$$

$$\tau_{c2} = \frac{2L_2 \eta}{c \ln(1/R_1 R_2)} \quad (6)$$

– времена жизни фотонов ГС в РОС- и внешнем резонаторах [12] соответственно; V – видность интерференционной картины; R_1, R_2 – коэффициенты отражения зеркал,

образующих внешний резонатор; L_2 – длина внешнего резонатора.

Последнее слагаемое в уравнении (2), которое не используется в обычной модели скоростных уравнений, описывает заселение возбужденного состояния молекул НП за счет как безызлучательного индуктивно-резонансного переноса энергии (перенос по обменно-резонансному механизму при используемых концентрациях молекул ГС и НП можно не учитывать) с возбужденных молекул ГС, так и перепоглощения излучения люминесценции ГС, направление распространения которого отличается от направления оси резонатора.

Действительно, как показал дальнейший анализ, обуславливаемые процессы играют заметную роль в динамике развития генерации рассматриваемой лазерной системы. Детальные расчеты параметра k требуют корректного учета безызлучательного переноса энергии, а также описания перепоглощения излучения люминесценции ГС насыщающимся поглотителем для определенной геометрии накачанной области АС; вследствие этого они достаточно громоздки (см., напр., работы [13, 14] в которых рассчитано влияние перепоглощения излучения генерации и люминесценции в ЛК с бинарной АС).

Нами проведены приближенные оценки параметра k . В случае излучательного переноса энергии k может быть положено равным половине диаметра накачанной области АС, поскольку основной вклад в генерационные характеристики рассматриваемой лазерной системы будут вносить лишь молекулы НП, находящиеся в пространственной области воздействия излучения возбуждения. Типичный диаметр сфокусированного излучения накачки составляет $\sim 50 - 100$ мкм, вследствие чего параметр k может быть оценен в пределах $(2.5 - 5) \cdot 10^{-3}$ см. При практически используемых концентрациях молекул ГС и НП и критическом радиусе безызлучательного индуктивно-резонансного переноса энергии (~ 40 Å) параметр k может быть оценен как 10^{-3} см [15]. Таким образом, безызлучательный перенос энергии вносит сопоставимый с люминесцентным перепоглощением вклад в заселение возбужденного состояния НП, а параметр k может варьироваться в пределах $10^{-3} - 10^{-2}$ см.

Пусть возбуждающий импульс имеет гауссов временной профиль:

$$I_p = I_p^0 \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{t}{T} \right)^2 \right], \quad (7)$$

где I_p^0, T – пиковая плотность мощности и длительность импульса возбуждения на полувысоте соответственно. Тогда мощность генерации P_1 и P_2 на длинах волн λ_1 и λ_2 определится следующим образом [16]:

$$P_1 = \frac{1}{2} \frac{hc abL}{\lambda_1 \tau_{c1}} q_1, \quad (8)$$

$$P_2 = \frac{hc abL_2}{\lambda_2 \tau_{c2}} q_2, \quad (9)$$

где $a = (N\sigma_p + N_a\sigma_{pa})^{-1}$ – глубина проникновения возбуждающего излучения в раствор красителя (определяется как глубина, на которой происходит ослабление накачки в e раз); h – постоянная Планка; b – высота возбужденного объема.

Система скоростных уравнений (1)–(4) решалась методом Рунге–Кутты четвертого порядка с использованием начальных условий, задаваемых при $t \ll -T$. В рас-

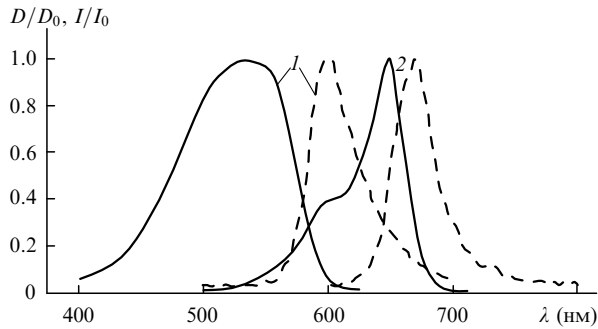


Рис.1. Спектры поглощения D/D_0 (сплошные кривые) и люминесценции I/I_0 (штриховые кривые) 6-аминофеналемина (1) и оксазина-1 (2).

четах использовались следующие молекулярные параметры, соответствующие паре красителей 6-аминофеналемин (АФН) в качестве ГС и оксазин 1 (ОКС) в качестве НП (нормированные спектры поглощения и люминесценции АФН и ОКС приведены на рис.1): $\sigma_p = 7 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$, $\sigma_{pa} = 2 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$, $\sigma_{e1} = 6.8 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$, $\sigma_{e2} = 6.5 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$, $\sigma_{a1} = 4.2 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$, $\sigma_{a2} = 2.1 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2$, $\sigma_{1aa} = 1.7 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$, $\sigma_{2aa} = 1.9 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$, $\sigma_{aa} = 1.8 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$, $\eta = 1.36$, $\Omega_1 = 5.2 \cdot 10^{-8}$, $\Omega_2 = 3 \cdot 10^{-6}$, $\tau = 4 \text{ нс}$, $\tau_a = 3 \text{ нс}$, $k = 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ см}$, $\lambda_1 = 595 \text{ нм}$, $\lambda_2 = 610 \text{ нм}$, $L = 0.9 \text{ см}$, $L_2 = 5 \text{ см}$, $V = 1$, $b = 200 \text{ мкм}$, $T = 10 \text{ нс}$, $C = 2 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л}$, $C_a = N_a/A = 5 \cdot 10^{-5} \text{ моль/л}$ (A – число Авогадро).

На рис. 2 представлены результаты расчетов динамических характеристик генерации РОС-ЛК со спектраль-

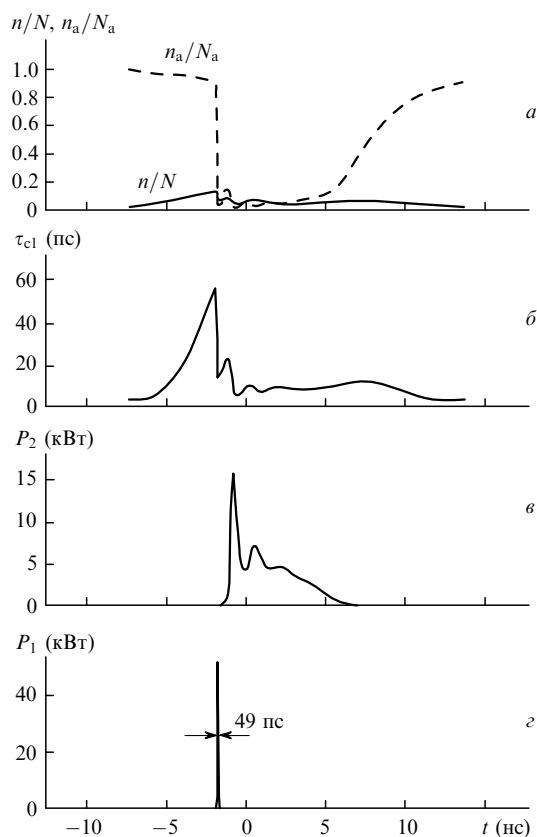


Рис.2. Временные зависимости населенности возбужденного состояния ГС n/N и основного состояния НП n_a/N_a (а), времени жизни фотонов в резонаторе с РОС (б), а также выходной мощности генерации, сформированной во внешнем резонаторе (в) и РОС-резонаторе (з) при двукратном превышении интенсивности возбуждения порогового значения; $R_1 = 1$, $R_2 = 0.04$.

ным переключением при двукратном превышении интенсивности возбуждающего излучения над порогом. Длительность импульса генерации на длине волны, определяемой РОС, составляет 49 пс, а КПД генерации – 1.5%. Анализ показывает, что даже при четырехкратном превышении интенсивности возбуждения над порогом, когда появляется второй импульс генерации на длине λ_1 , его интенсивность практически на порядок меньше интенсивности первого импульса. Заметим, что такая генерация качественно отличается от генерации, имеющей место в системах с релаксационными колебаниями и с «обычным» режимом ПМД, где при больших превышениях над порогом генерируется группа импульсов, сопоставимых по интенсивности. В рассматриваемом здесь варианте слабые последующие импульсы, идущие за первым «квазиодиночным», при необходимости могут с успехом быть подавлены комбинацией «усилитель – нелинейный фильтр».

Генерация на длине волны λ_2 , определяемой настройкой внешнего спектрально-селективного резонатора, развивается после просветления НП (см. рис.2,а,в) и по времени отстает от генерации на РОС-структуре. При этом время жизни фотонов в лазере резко сокращается (что соответствует низкой инверсной населенности ГС за счет генерации во внешнем резонаторе при просветленном НП), вследствие чего порог для генерации на длине волны λ_1 не достигается (см. рис.2,б).

Таким образом, проведенные расчеты показали, что в РОС-лазере со спектральным переключением генерации возможна генерация стабильного одиночного переформируемого по частоте пикосекундного импульса при значительном превышении интенсивности накачки над пороговой.

Схема экспериментальной установки приведена на рис.3,а. Для возбуждения лазера 6 и усилителя 8 применялось вертикально поляризованное излучение второй гармоники твердотельного АИГ: Nd^{3+} -лазера 1 ($\lambda_p = 532 \text{ нм}$) с длительностью импульса на полувысоте $T = 10 \text{ нс}$ и частотой следования импульсов 5 Гц. Для варьирования энергии возбуждения применялись нейтральные светофильтры 2; при этом контроль осуществлялся при помощи измерителя лазерной мощности ИМО-3. В качестве базового РОС-лазера использовался лазер «Гном-2» (схема приведена на рис.3,б), перестройка длины волны генерации ГС осуществлялась изменением угла поворота перестроечных зеркал 13. Внешний резонатор был образован двумя призмами типа Литтрова 15, 16, одна из которых имела алюминиевое напыление на задней отражающей грани, а вторая – ненапыленную отражающую поверхность, что обеспечивало требуемую низкую добротность внешнего спектрально-селективного резонатора.

В качестве пары красителей был использован этанольный раствор АФН (ГС) с концентрацией $C = 2 \cdot 10^{-3} \text{ моль/л}$ и ОКС (НП) с концентрацией $C_a = 5 \cdot 10^{-5} \text{ моль/л}$ (молекулярные параметры данных соединений использовались при проведении описанных выше расчетов). РОС-лазер был настроен на длину волны генерации $\lambda_1 = 595 \text{ нм}$, а внешний резонатор – на $\lambda_2 = 610 \text{ нм}$ (ширина наблюдаемого спектра генерации ГС во внешнем резонаторе составляла порядка 2 нм). Длина внешнего резонатора L_2 была равна 5 см, а длина формируемой в активной среде РОС-структуры составляла 0.9 см, что соответствовало длине активной среды L .

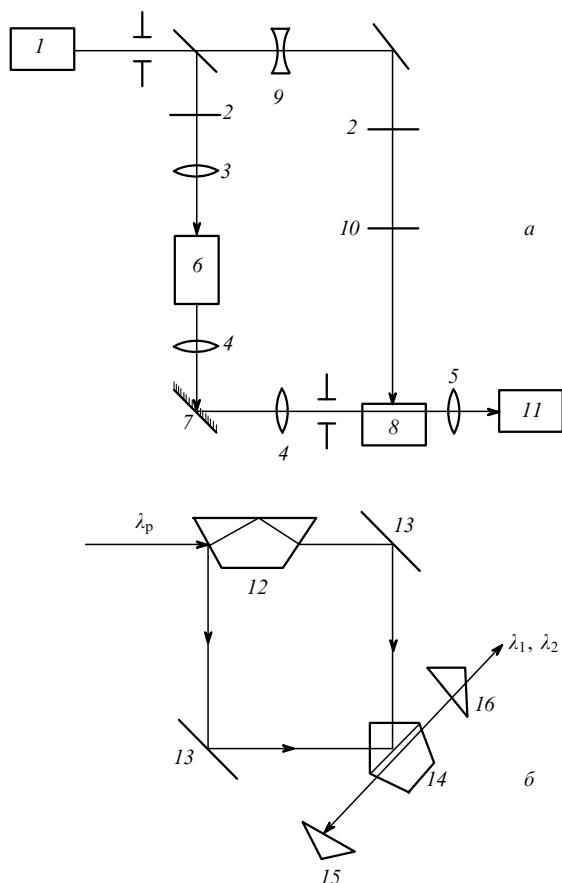


Рис.3. Схемы экспериментальной установки (а) и РОС-лазера с внешним спектрально-селективным резонатором (б):

1 – лазер на АИГ:Nd³⁺; 2 – нейтральные светофильтры; 3 – телескоп; 4, 5 – сферические линзы; 6 – лазер; 7 – дифракционная решетка; 8 – кювета с красителем (усилитель); 9 – отрицательная линза; 10 – цилиндрическая линза; 11 – система регистрации; 12 – делительная призма; 13 – перестраиваемые зеркала; 14 – призма-кювета; 15, 16 – призмы Литтрова с алюминиевым напылением на отражающей поверхности и без него соответственно.

Дифракционная решетка (1200 штр./мм) 7 служила для пространственного разделения излучения генерации ГС на длинах волн λ_1 и λ_2 . Усиленное излучение генерации на длине волн, определяемой РОС (в качестве усилителя использовалась поперечно накачиваемая сантиметровая кювета с этанольным раствором АФН с концентрацией 10⁻³ моль/л), после реколлимации линзой 5 направлялось в систему регистрации 11. Для наблюдения спектрального состава излучения генерации использовался монохроматор МДР-6У.

При осциллографической регистрации уверенно наблюдался одиночный импульс генерации на длине волн, определяемой РОС (его длительность на полувысоте, задаваемая аппаратной функцией системы регистрации, составляла 1 нс), длительность импульса генерации на длине волн λ_2 равнялась примерно 7 нс, при этом интенсивность возбуждающего излучения в два раза превышала пороговую. При перекрытии внешнего резонатора длительность импульса генерации в РОС-лазере резко увеличивалась (до 6–8 нс) при той же интенсивности возбуждения.

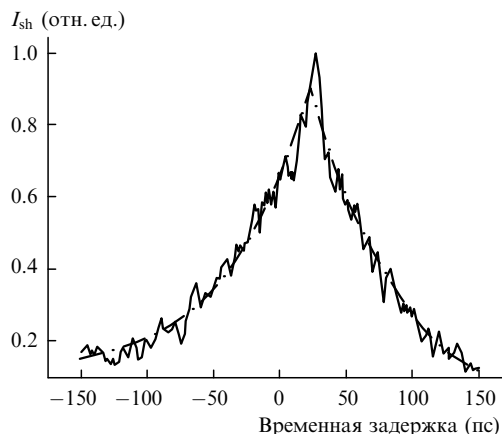


Рис.4. Экспериментальная (сплошная кривая) и аппроксимационная (штрихпунктирная кривая) автокорреляционная функция одиночного импульса генерации РОС-лазера со спектральным переключением.

На рис.4 представлен вид автокорреляционной функции одиночного импульса генерации, измеренной методом неколлинеарной генерации второй гармоники. Оцененная по ширине автокорреляционной функции длительность одиночного импульса генерации составляла 46 пс, что находится в хорошем соответствии с результатами, полученными в расчетах.

Таким образом, теоретически и экспериментально показана возможность генерации стабильного одиночного перестраиваемого пикосекундного импульса в РОС-лазере на бинарной смеси органических красителей в режиме спектрального переключения при значительном превышении пороговых интенсивностей накачки. Результаты настоящей работы могут служить основой для создания простых и надежных источников одиночных перестраиваемых по частоте УКИ при возбуждении лазера импульсами наносекундной длительности. Кроме того, предложенный метод спектрального переключения генерации может быть использован и в лазерах на основе других широкополосных активных сред.

1. Звелто О. *Принципы лазеров* (М., Мир, 1984).
2. Hebling J., Seres I., Bor Zs., Racz B. *Opt. and Quant. Electron.*, **22**, 375 (1990).
3. Гафуров Х.Г., Криндач Д.П., Нехаенко В.А., Яковлев А.Г. *Квантовая электроника*, **12**, 1279 (1985).
4. Fork R.L., Greene B.I., Shank C.V. *Appl. Phys. Letts*, **38**, 671 (1981).
5. Schafer F.P., Lee W., Szatmari S. *Appl. Phys. B*, **32**, 123 (1983).
6. Simon P., Klebniczki J., Szabo G. *Optics Comms*, **56**, 359 (1986).
7. Hebling J. *Optics Comms*, **64**, 539 (1987).
8. Бор Ж. *Изв. АН СССР. Сер. физич.*, **48**, 1527 (1984).
9. Катаркевич В.М., Курстак В.Ю., Рубинов А.Н., Эфендиев Т.Ш. *Квантовая электроника*, **23**, 1091 (1996).
10. Shank C.V., Bjorkholm J.E., Kogelnik H. *Appl. Phys. Letts*, **18**, 395 (1971).
11. Hebling J., Bor Z. *Digest of IV Conf. on Luminescence* (Szeged, 1982, p. 331).
12. Hebling J. *Appl. Optics*, **28**, 417 (1989).
13. Левин М.Б., Рева М.Г., Родченкова В.В., Ужинов Б.М. *Квантовая электроника*, **13**, 1272 (1986).
14. Левин М.Б., Ужинов Б.М. *Квантовая электроника*, **17**, 403 (1990).
15. Ермилов Е.А., Гулис И.М. В сб.: *Лазерная физика и спектроскопия* (Гродно, изд-е Института физики, 1997, т. 2, с. 268).
16. Hebling J. *Appl. Phys. B*, **47**, 267 (1988).