

МОЩНЫЙ УЗКОПОЛОСНЫЙ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЛАЗЕР НА КРАСИТЕЛЯХ

П. Г. Дальченко¹, М. И. Дзюбенко², В. П. Пелипенко²

¹*Украинская инженерно-педагогическая академия
16, ул. Университетская, Харьков, 61003, Украина*

²*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: P_dalchenko@mail.ru*

Изучены спектрально-энергетические характеристики импульсно-периодического двухкаскадного лазера, состоящего из задающего генератора и многопроходного усилителя. Определены условия подавления широкополосного фона и повышения эффективности преобразования энергии в узкую инжектируемую линию. Полученные экспериментальные результаты согласуются с теоретическими выводами. Создан мощный перестраиваемый узкополосный импульсно-периодический лазер на красителях с ламповой накачкой, обеспечивающий среднюю мощность излучения более 4,0 Вт при ширине линии 0,1 нм и перекрывающий спектральный диапазон 460–680 нм. Ил. 3. Библиогр.: 12 назв.

Ключевые слова: лазер, красители, мощный, перестраиваемый.

В настоящее время для решения ряда задач спектроскопии, фотохимии, дистанционного зондирования и т. п. [1] широко используются источники мощного перестраиваемого излучения оптического диапазона спектра. Среди таких источников важное место занимают лазеры на красителях с ламповой накачкой, работающие в импульсно-периодическом режиме и излучающие импульсы микросекундной длительности. Применение этих лазеров для решения некоторых задач комбинационного рассеяния обеспечивает более высокую чувствительность, чем в случае лазеров на красителях наносекундной длительности, характерной для лазеров с когерентной накачкой, поскольку они позволяют использовать более низкую плотность анализируемого вещества и допускают большую энергию, которая вносится в исследуемый объем. Однако в лазерах на красителях с ламповой накачкой обычно сложно обеспечить одновременно высокую энергию и узкую спектральную ширину линии излучения. Большие энергии излучения лазеров данного типа были получены в неселективных резонаторах, когда ширина полосы генерации составляла величину порядка 5–10 нм [2]. Применение частотно-селективных резонаторов позволяет уменьшить ширину линии излучения на несколько порядков. Однако увеличение потерь резонатора за счет введения в него дисперсионных элементов приводит к существенному уменьшению выходной энергии и КПД лазера. Поэтому узкополосные лазеры обычно маломощные. Для получения мощного излучения в узкой линии применяют оптические усилители [3–6]. Наиболее подходящими для этих целей оказались многопроходные усилители лазеров на красителях. Ранее мы сообщали об экспериментальном исследовании однопроходовых и многопроходовых усилителей на растворе 4-метил-7-оксикумарина, работающего

в одноимпульсном режиме и на фиксированной длине волны [6]. В работе [7] нами проведено теоретическое рассмотрение особенностей работы усилителя с обратной связью на родамине 6Ж с ламповой накачкой. Цель данной работы – экспериментальное исследование спектрально-энергетических характеристик двухкаскадного перестраиваемого импульсно-периодического лазера на растворах некоторых известных эффективных красителей, генерирующих в основных областях видимого спектра.

1. Экспериментальная установка. Для решения поставленной задачи было создано несколько систем накачки лазеров на красителях на основе трубчатых импульсных с ксеноновым наполнением, которые различались геометрическими размерами ламп, параметрами электрического разрядного контура и геометрией осветителя. При разработке этих систем были использованы условия электрического и спектрального согласования, полученные ранее в работах [8, 9] для типичного разрядного контура в режиме нестационарных разрядов микросекундной длительности. Каждая из созданных систем накачки позволяла проводить исследования как в одноимпульсном, так и в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов до 10 Гц.

Двухкаскадный импульсно-периодический лазер состоял из задающего генератора (ЗГ) и усилителя, работающего в режиме многопроходового усиления (МПУ). ЗГ и МПУ питались от разных контуров, которые включали в себя батареи накопительных конденсаторов типа К-75-48 суммарной емкостью 0,66 и 3 мкФ. Накачка растворов красителей осуществлялась импульсными лампами типа ИМП-5/250 и ИМП-7/300, соответственно, разработанными и изготовленными специально для данного лазера. С целью увеличения светоот-

дачи ламп и ресурса их работы в них поддерживался дежурный разряд постоянного тока силой около 2А [10].

Разрядные контуры ЗГ и усилителя подключались таким образом, чтобы накопительные емкости заряжались от одного источника питания и коммутировались общим для обоих контуров разрядником. В качестве коммутатора использовался малоиндуктивный керамический разрядник типа РУ-65, адаптированный для работы в диапазоне напряжений 5–20 кВ. Разрядная цепь каждой лампы разделялась дополнительными резисторами. Главное преимущество используемой схемы с общим разрядником – надежная синхронизация разряда накопительных емкостей.

Излучатель ЗГ и усилителя рассчитывались для эффективной работы лазера в середине видимого участка спектра ($\lambda_{\text{пор}} = 550$ нм). Кювета с активным элементом и лампой накачки размещались в стандартном эллиптическом осветителе с зеркально отражающей поверхностью. Параметры эллипса выбирались из условия макси-

мального использования излучения лампы при заданных поперечных размерах плазменного шнура разряда и кюветы с раствором красителя.

Циркуляция активной и охлаждающей жидкостей в ЗГ и МПУ осуществлялась с помощью двух независимых двухконтурных систем прокачки. Первый контур содержал резервуар емкостью 3 л, заполненный дистиллированной водой или раствором красителя. Во втором контуре системы прокачки использовалась водопроводная вода, обеспечивающая стабилизацию температуры активного раствора и охлаждающей жидкости. Скорость прокачки раствора красителя составляла около 6 л/с, что обеспечивало полную его смену в кювете за время между импульсами.

Оптическая схема ЗГ и схема измерения его характеристик представлены на рис. 1. Резонатор ЗГ был образован двумя плоскими зеркалами 1, 6 с коэффициентами отражения $R_1 = 99,8\%$ и $R_2 = 50\text{--}80\%$ соответственно. Длина резонатора, в зависимости от условий эксперимента, могла изменяться от $L_{\text{min}} = 600$ мм до $L_{\text{max}} = 1700$ мм.

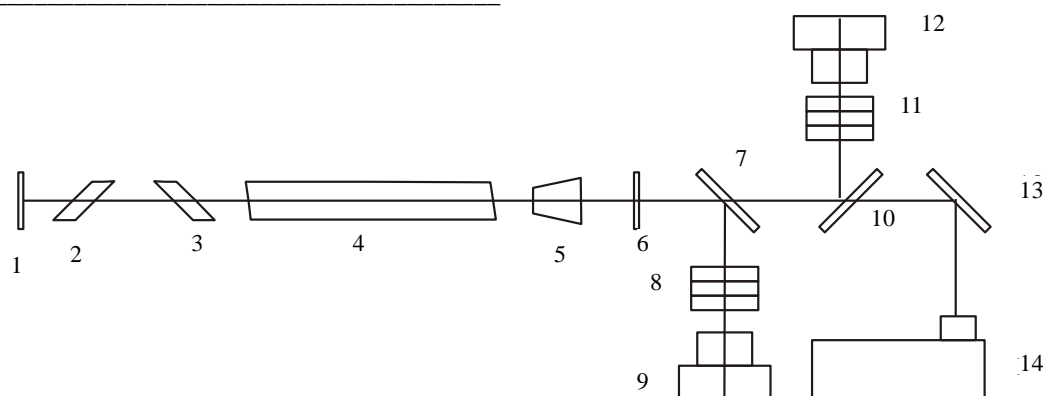


Рис. 1. Оптическая схема ЗГ и схема измерения его характеристик: 1 – глухое зеркало ЗГ; 2 – ИПФ № 1; 3 – ИПФ № 2; 4 – активный элемент; 5 – телескоп Галилея; 6 – выходное зеркало ЗГ; 7, 10, 13 – делительные пластинки; 8, 11 – эталоны Фабри-Перо; 9, 12 – фотоаппараты; 14 – спектрограф

Для сужения и перестройки линии генерации ЗГ в его резонатор устанавливались дисперсионные элементы 2, 3, в качестве которых в данной работе использовались два набора интерференционно-поляризационных фильтров (ИПФ). Выбор ИПФ для селекции частоты генерации лазера обусловлен не критичностью их к расходимости излучения, низкими потерями, вносимыми в резонатор, и высокой лучевой стойкостью. ИПФ № 1 был изготовлен из кристаллического кварца и имел полосу пропускания, измеренную по уровню 0,5 от максимума $\Delta\lambda_{0,5} = 2$ нм, и область свободной дисперсии $\Delta\lambda_{\text{rang}} = 20$ нм. ИПФ № 2 изготовлен из исландского шпата и обеспечивает $\Delta\lambda_{0,5} = 0,1$ нм и $\Delta\lambda_{\text{rang}} = 1,8$ нм. Каждый фильтр содержал 8 одинаковых пластин, установленных параллельно друг другу, под углом $\sim 57^\circ$ к оси резонатора. Фильтры первоначально были рассчита-

ны для работы в желто-оранжевой области спектра $\lambda = 580\text{--}600$ нм. Телескоп 5, построенный по схеме Галилея с увеличением в 1,7 раза, служил для согласования апертур ЗГ и усилителя. Длина волны генерации контролировалась спектрографом 14, состоящем из камеры УФ-90 и дифракционной решетки ($n = 1200$ штр/мм). Определение ширины линии излучения производилось путем регистрации интерференционных картин на выходе эталонов Фабри-Перо 8, 11 фотоаппаратами 9, 12. Для измерения выходной энергии излучения ЗГ и МПУ применялись стандартные измерители типа ИКТ-1М, а для измерения средней мощности лазерного излучения использовались приборы типа ИМО-2Н.

2. Результаты и их обсуждение. В качестве активной среды ЗГ использовались эталонные растворы 4-метил-7-оксикумарина

(4МУ), иминокумарина (G-286) [2], родамина 6Ж (Р6Ж) и оксазина 17 (ОК17), генерирующих в неселективном резонаторе на длинах волн 460, 530, 585, 660 нм соответственно. В оптимальных условиях и одноимпульсном режиме выходная энергия составляла 0,3–0,4 Дж, ширина линии генерации $\Delta\lambda = 5,0\text{--}8,0$ нм, угловая расходимость $\varphi \approx 5\text{--}10$ мрад. В импульсно-периодическом режиме при частоте следования импульсов 10 Гц этот лазер обеспечивал среднюю мощность излучения 2,5–4,0 Вт при той же расходимости.

На эффективность генерации, угловую расходимость излучения и другие характеристики лазеров на растворах красителей с ламповой накачкой существенно влияют термооптические искажения активной среды, вызванные неоднородным нагревом жидкой активной среды по объему кюветы, вследствие поглощения излучения накачки в широком спектральном диапазоне. Неоднородность нагрева также вызвана неравномерностью освещения поверхности активного элемента, фокусирующим действием кюветы и наличием светопоглощения в активном растворе.

Термооптические искажения, возникающие в растворе красителя при интенсивной накачке, приводят к возбуждению в резонаторе лазера различных типов лучевых траекторий:

- параксиальных – распространяющихся по прямолинейным траекториям, параллельным оси кюветы;

- меридиональных – распространяющихся по периодическим траекториям, которые лежат в плоскости, проходящей через ось кюветы;

- спиральных – распространяющихся вблизи стенки кюветы по спиральным траекториям с постоянным радиусом кривизны.

Коэффициенты усиления для этих трех типов лучей определяются выражениями [11]

$$G_{\text{ак}} = \exp(2kI_0l);$$

$$G_{\text{мер}} = G_{\text{ак}} \exp\left[\frac{\chi^2 R^2 - n_0^2 \rho_0^2}{4 R^2}\right];$$

$$G_{\text{спир}} = G_{\text{ак}} \exp\left[\frac{\chi^2 R^2 - n_0^2 \rho_0^2}{2 R^2}\right],$$

где k – коэффициент, зависящий от характеристик активной среды лазера; I_0 – плотность накачки на оси кюветы; l – длина активной среды; χ – коэффициент поглощения раствора; R – внутренний радиус кюветы; ρ_0 – амплитудное отклонение ме-

ридиальных и спиральных лучей от оси и n_0 – показатель поглощения раствора.

Коэффициенты усиления $G_{\text{мер}}$ и $G_{\text{спир}}$, как следует из приведенных выражений, при других равных условиях максимальны для тех траекторий, которым соответствует амплитуда $\rho_0 = R\chi$, где усиление среды максимально. Кроме того, эти коэффициенты усиления в значительной степени определяются соотношением между χR и n_0 . Отношение коэффициентов усиления для меридиональных и спиральных лучей можно найти из выражения

$$\frac{G_{\text{спир}}}{G_{\text{мер}}} = \frac{G_{\text{мер}}}{G_{\text{ак}}} = \exp\left[\frac{\chi^2 R^2 - n_0^2}{4}\right].$$

Видно, что при условии $\chi^2 R^2 > n_0$ коэффициент усиления для спиральных лучей значительно превосходит остальные. По этой причине при высоких концентрациях активных молекул в растворе именно эти лучевые траектории будут оказывать решающее значение на пространственно-угловые характеристики излучения лазеров на красителях с ламповой накачкой [11].

Для подавления спиральных лучей мы использовали небольшие концентрации красителей ($\chi R \approx 3 \text{ см}^{-1}$) и большие базы резонатора ($L = 1600$ мм), что привело к уменьшению расходимости излучения ЗГ до величины $\varphi = 2\text{--}3$ мрад при выходной энергии 0,05–0,12 Дж.

В ЗГ для сужения и перестройки линии генерации в его резонатор устанавливали интерференционно-поляризационные фильтры. Введение в резонатор ИПФ № 1 приводило к сужению линии до 1,8 нм и уменьшению энергии генерации до 16 мДж. При одновременной установке в резонаторе ИПФ № 1 и ИПФ № 2 ширина линии уменьшалась до 0,1 нм, а W_r до 5–10 мДж при $\varphi \approx 2$ мрад. В импульсно-периодическом режиме при той же расходимости средняя выходная мощность составляла $P_{\text{ср}} = 0,05\text{--}0,1$ Вт.

Для увеличения выходной мощности лазера узкополосное излучение ЗГ усиливалось в МПУ, работающего в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов $f = 10$ Гц [12]. Оптическая схема двухкаскадного лазера представлена на рис. 2, где 6, 8 – зеркала резонатора МПУ, причем зеркало 6 является общим для ЗГ и усилителя. В качестве активного элемента усилителя 7 использовалась кварцевая кювета, с внутренним диаметром 10 мм и длиной 300 мм, через которую прокачивался раствор красителя.

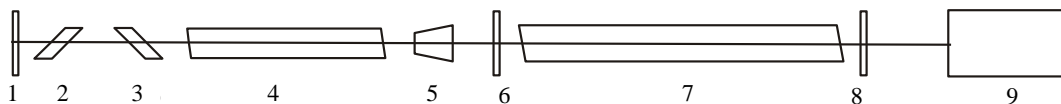


Рис. 2. Оптическая схема ЗГ и МПУ: 1 – глухое зеркало ЗГ; 2 – ИПФ № 1; 3 – ИПФ № 2; 4 – активный элемент; 5 – телескоп Галилея; 6 – общее зеркало ЗГ и МПУ; 7 – активный элемент МПУ; 8 – выходное зеркало МПУ; 9 – измеритель энергии

В отсутствие излучения инъекции МПУ работал как широкополосный генератор с самовозбуждением и обеспечивал $P_{\text{ген}} = 5\text{--}10$ Вт. Электрическая энергия накачки составляла 256 Дж при длительности импульса 3 мкс.

Если до начала собственной генерации в МПУ в его резонатор инжектируется узкополосное излучение ЗГ достаточной мощности, то происходит захват и далее в МПУ генерируется собственный импульс узкополосного излучения с частотой, близкой к частоте инъекции. При настройке длины волны ЗГ на среднюю длину волны МПУ величина мощности инжектируемого сигнала соответствует минимальному значению и может быть оценена по формуле [6]

$$P_{\min} = 8\pi^2 n_0^2 c R^2 \exp\left[\frac{\chi^2 R^2 - n_0^2}{2}\right] \int_{[\delta\lambda]} \frac{\sigma_e(\lambda')}{\sigma_e(\lambda_i)} \frac{g}{\lambda'^2} d\lambda,$$

где $\sigma_e(\lambda')$ и $\sigma_e(\lambda_i)$ – сечения вынужденного излучения на длине волны λ' и длине волны инъекции λ_i ; область интегрирования включает все λ , для которых $k_{yc}(\lambda) \geq k_{yc}(\lambda_i)$; $g = \theta/4\pi$ – геометрический фактор, где θ – телесный угол, ограничивающий поток выходного излучения МПУ, которое работает в режиме свободной генерации. Оценка P_{\min} для раствора 4МУ при типичных условиях эксперимента ($R = 5$ мм; $n_0 = 1,36$; $\sigma_e \approx 5 \cdot 10^{-17}$ см²; $C = 3,5 \cdot 10^{-4}$ моль/л, $g = 10^{-4}$) дает величину $P_{\min} \approx 1,5$ кВт. В эксперименте минимальная мощность инжектируемого сигнала составляла для 4МУ на $\lambda_i = 460$ нм около 4 кВт. Для родамина 6Ж на $\lambda_i = 585$ нм, $P_{\min} \approx 1$ кВт. Коэффициент усиления МПУ при этом равен $k_{yc} \approx 300$. По мере отстройки длины волны инъекции λ_i относительно длины волны максимального усиления МПУ λ_{\max} происходит рост P_{\min} , необходимый для надежного захвата, а k_{yc} падает. Для родамина 6Ж, например, при отстройке от λ_{\max} на 6,0 нм мощность инжектируемого сигнала, необходимая для надежного захвата, возросла почти на порядок. При мощности инъекции $P_{\min} \approx 25$ кВт надежный захват наблюдался во всей полосе перестройки ЗГ 578–600 нм.

Аналогичные результаты были получены и для других красителей, генерирующих в синей, зеленой и красной областях спектра. Расходимость излучения, определяемая термооптическими искажениями, апертурой кюветы и длиной резонатора, имела величину порядка 15–20 мрад.

В интегральном спектре излучения МПУ, кроме инжектируемой линии, наблюдается также широкополосный фон с центральной длиной волны, соответствующей максимуму контура усиления. Эта широкая фоновая полоса обусловлена суперлюминесценцией и собственной генерацией МПУ. Уровень фонового излучения существенно зависит от мощности инжектируемого сигнала, величины отстройки и интенсивности возбуждения МПУ. Для подавления широкополосного фона и увеличения эффективности преобразования энергии в узкую линию инжектируемый сигнал должен подаваться в резонатор МПУ до начала возникновения собственной генерации, а его мощность должна превышать интенсивность суперлюминесценции, при этом апертуры ЗГ и МПУ должны быть тщательно согласованы. Выполнение указанных требований позволило значительно снизить фоновое излучение на выходе МПУ. Так, при мощности инжектируемого сигнала $P_{\min} = 25$ кВт ($W_i = 0,05$ Дж) коэффициент усиления МПУ составлял $k_{yc} \approx 12$, а интенсивность фонового излучения практически отсутствовала. Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с теоретическими выводами работы [4]. Перестроечные характеристики двухкаскадного лазера, полученные с селектором ИПФ № 1, на растворах ряда красителей в импульсно-периодическом режиме при энергии накачки 256 Дж и частоте повторения импульсов 10 Гц представлены на рис. 3. Резонатор ЗГ образован плоскими зеркалами с коэффициентами отражения $R_1 = 99,8\%$ и $R_2 = 75\%$. Длина резонатора ЗГ составляла $L = 1000$ мм. Резонатор МПУ длиной $L = 400$ мм был образован зеркалами с коэффициентами отражения $R_2 = 75\%$ и $R_3 = 45\%$, причем зеркало R_2 является общим для ЗГ и усилителя.

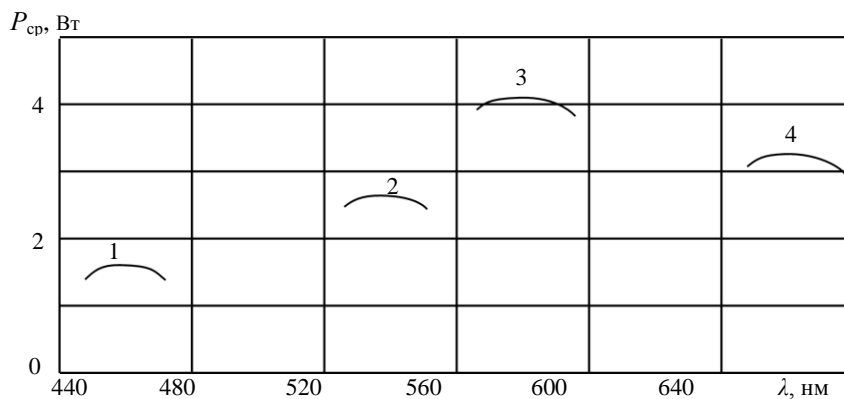


Рис. 3. Спектрально-энергетические характеристики двухкаскадного лазера на спиртовых растворах красителей: 1–4 – метилумбеллиферон; 2 – имунокумарин; 3 – родамин 6Ж; 4 – оксазин 17

Выводы. В результате проведенной работы экспериментально изучены спектрально-энергетические характеристики импульсно-периодического двухкаскадного лазера, состоящего из ЗГ и МПУ, в качестве активной среды которого использовались спиртовые растворы 4-метилумбеллиферона, иминокумарина, родамина 6Ж и оксазина 17. Осуществлена плавная перестройка инжектируемой линии в пределах контура усиления каждого из применявшихся красителей. Определены условия подавления широкополосного фона и повышения эффективности преобразования энергии в узкую инжектируемую линию. Создан мощный перестраиваемый узкополосный импульсно-периодический лазер на красителях с ламповой накачкой, обеспечивающий среднюю мощность излучения более 4,0 Вт при ширине линии 0,1 нм и перекрывающий спектральный диапазон 460–680 нм.

1. *Gittins C. M., Shenoy S. U., Aldag H. R. et al.* Measurements of major species in a high pressure gas turbine combustion simulator using Raman scattering // 38th AIAA Aerospace Sciences, Meeting & Exhibit. – 2000. – Paper No. 2000-0772.
2. *Дзюбенко М. И., Маслов В. В., Шевченко В. В.* Эффективные импульсно-периодические лазеры на красителях с ламповой накачкой // Успехи соврем. радиоэлектрон. – 2004. – № 1. – С. 30–38.
3. *Рубинов А. Н., Стрижнев В. С.* Генерационные характеристики систем генератор – усилитель на основе красителей с ламповым возбуждением // Журн. прикладной спектроскопии. – 1979. – 31, № 3. – С. 436-439.
4. *Nagasawa S., Hirono M., Fujiwara M. A.* Reliable Efficient Forced Oscillator dye Laser to Measure the Upper Atmospheric Sodium layer // Jap. J. Appl. Phys. – 1980. – 19, No. 1. – P. 143–147.
5. *Schneeberger B., Laeri F., Tschudi T., Heiniger F.* Image amplifier for coherent optical active feed-back in the 514 nm range // Optics Commun. – 1981. – 36, No. 2. – P. 107–110.
6. *Дзюбенко М. И., Науменко И. Г., Пелипенко В. П.* Многокаскадный лазер с ламповой накачкой // Квантовая электрон. – 1987. – Вып. 32. – С. 13–25.
7. *Дальченко П. Г., Дзюбенко М. И., Замковой А. С., Шевченко В. В.* Исследование двухкаскадных перестраиваемых лазеров на красителях // Радиотехника. – 2008. – Вып. 152. – С. 112–116.
8. *Пелипенко В. П., Дзюбенко М. И., Шевченко В. В.* Исследование гистерезиса вольтамперных характеристик разрядов микросекундной длительности в импульсных лампах // Квантовая электрон. – 1988. – Вып. 35. – С. 65–72.
9. *Пелипенко В. П., Дзюбенко М. И., Шевченко В. В.* Оптимизация ламповых систем накачки импульсных лазеров на органических соединениях // Электронная техн. Сер. Лазерная техн. и оптоэлектрон. – 1990. – Вып. 3 (55). – С. 44–48.

10. *Дзюбенко М. И., Замковой А. С., Пелипенко В. П., Шевченко В. В.* Влияние вспомогательных разрядов на энергетические характеристики лазеров на красителях с ламповой накачкой // Радиотехника. – 2006. – Вып. 146. – С. 269–274.
11. *Дзюбенко М. И., Науменко И. Г., Пелипенко В. П., Шевченко В. В.* Исследование пространственно-угловых характеристик лазеров на растворах органических соединений // Квантовая электрон. – 1992. – Вып. 43. – С. 3–24.
12. *Dalchenko P. G., Dzyubenko M. I., Pelipenko V. P.* Two-stage dye laser with lamp pumping // Proc. of CAOL 2008. 4th International Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers. – Alushta, 2008. – P. 279–281.

HIGH-POWER NARROW-BAND TUNABLE IMPACT PERIODIC DYE LASER

P. G. Dalchenko, M. I. Dzyubenko,
V. P. Pelipenko

Wavelength-power characteristics impact, periodic, two-stage laser, composed of signal generator and multipass amplifier, were studied. Conditionals of suppression broadband background and increase transformation efficiency energy into narrow injected line were defined. Findings are in agreement with theoretical conclusions.

High-power, narrow-band, tunable, impact, periodic dye laser with lamp pumping, guaranteeing average power radiation under 4 Wt under line width 0,1 nm and overlying spectral range 460–680 nm was created.

Key words: laser, dye, high-power, tunable.

ПОТУЖНИЙ ВУЗЬКОСМУГОВИЙ ПЕРЕСТРОЮВАНИЙ ІМПУЛЬСНО-ПЕРІОДИЧНИЙ ЛАЗЕР НА БАРВНИКАХ

П. Г. Дальченко, М. І. Дзюбенко,
В. П. Пелипенко

Вивчено спектрально-енергетичні характеристики імпульсно-періодичного двокаскадного лазера, який складається із задавального генератора і багатопрохідного підсилувача. Визначено умови придушення широкосмугового фону та підвищення ефективності перетворення енергії у вузьку інжектвану лінію. Одержані експериментальні результати узгоджуються з теоретичними висновками. Створено потужний перестроюваний вузькосмуговий імпульсно-періодичний лазер на барвниках з ламповою накачкою, який забезпечує середню потужність випромінювання більше 4,0 Вт при ширині лінії 0,1 нм і перекриває спектральний діапазон 460–680 нм.

Ключові слова: лазер, барвники, потужний, перестроюваний.

Рукопись поступила 20 февраля 2009 г.