

ЭФФЕКТИВНЫЙ ЛАЗЕР НА КРАСИТЕЛЯХ С ЛАМПОВОЙ НАКАЧКОЙ

С. С. АНУФРИК, С. П. ЗАБИРКО, И. А. МОРОЗОВ,
В. А. МОСТОВНИКОВ, В. С. МОТКИН, А. Н. РУБИНОВ и А. М. РУСЕЦКИЙ
Институт физики АН БССР, Минск

(Поступило в редакцию 1 сентября 1976 г.)

Описываются исследования, направленные на создание экспериментального образца эффективного перестраиваемого лазера на органических красителях с накачкой стандартными импульсными лампами. Даны основные характеристики созданного лазера и особенности его работы в разных режимах.

Для получения высоких к. п. д. и энергий генерируемого излучения наиболее перспективны лазеры на органических красителях с ламповой накачкой. От ОКГ на красителях с лазерным возбуждением они выгодно отличаются отсутствием многоступенчатого процесса преобразования световой энергии и простотой конструкции. С точки зрения возможностей внедрения в производство, на наш взгляд наиболее целесообразны такие схемы лазеров, в которых применены серийные элементы, в том числе стандартные трубчатые импульсные лампы.

Целью нашей работы было проведение исследований, направленных на создание экспериментального образца эффективного перестраиваемого лазера на органических красителях с накачкой стандартными импульсными лампами, который может быть положен в основу при разработке промышленных образцов. В этой статье описывается разработанный нами экспериментальный образец ОКГ «Самоцвет», имеющий следующие основные характеристики:

- спектральная область работы с плавной перестройкой в диапазоне 440...750 нм;
- энергия генерации при полуширине спектра 10 нм до 7 дж;
- энергия генерации при полуширине спектра не более 0,8 нм до 2 дж;
- энергия генерации при полуширине спектра не более 0,01 нм до 0,5 дж;
- длительность импульсов излучения 3...10 мкс;
- интервал между импульсами 2...3 мин.

Конструкция прибора блочная, узлы и элементы прибора максимально унифицированы. Внешний вид ОКГ «Самоцвет» с блоком питания и управления приведен на рис. 1.

Блок управления / выполнен автономным и позволяет осуществлять дистанционное управление и контроль за режимом работы лазера.

Блок питания прибора 2 состоит из конденсаторной батареи емкостью $C=10$ мкф (два конденсатора КМК — 25×5 , $L=40$ нГ), на которой непосредственно размещается высоковольтный выпрямитель, собранный по схеме преобразования напряжения. Применение такой схемы позволило значительно

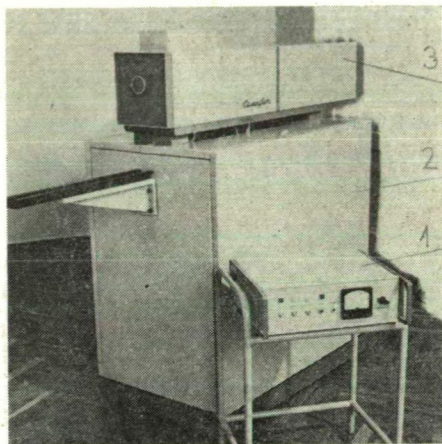


Рис. 1. Внешний вид ОКГ «Самоцвет» 1 — блок управления; 2 — блок питания; 3 — лазерная головка

уменьшить габариты и вес выпрямительного устройства. Для коммутации разряда рабочей батареи используется металлокерамический азотный разрядник Р—41.

Разрядный контур ОКГ обеспечивает получение периодического разряда с большой скоростью затухания тока. Для уменьшения индуктивности разрядного контура в лазерной головке использован токопровод коаксиальной конструкции; соединение элементов контура выполнено шинами минимальной длины. Расчетная величина индуктивности разрядного контура составляет 250 нГ, а добротность $Q \sim 1,4$. Длительность импульса накачки по уровню 0,35 составляет 10 мкс при крутизне переднего фронта 2,5 мкс. Максимальная энергия разряда равна 2 кДж.

Лазерная головка ОКГ 3 состоит из двух субблоков: непосредственно лазерной головки I (рис. 2), включающей в себя кювету с активным раствором 4, две импульсные лампы 3 типа ИФП—5000, отражатель 5, стопу I и призму 6, и селективного резонатора II, содержащего блочные на оптическом контакте

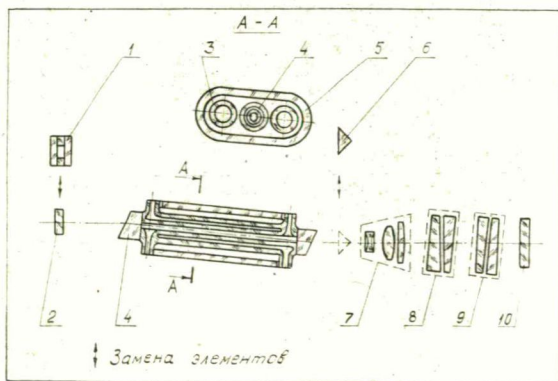


Рис. 2. Оптическая схема ОКГ «Самоцвет» 1 — стопа; 2 — полупрозрачное зеркало; 3 — импульсная лампа; 4 — кювета; 5 — отражатель; 6 — призма ПВО; 7 — телескоп; 8, 9 — интерферометры Фабри-Перо; 10 — «глухое» зеркало

[1] интерферометры Фабри-Перо 8, 9, телескоп 7 и «глухое» зеркало 10. На рис. 3 приведен внешний вид головки ОКГ «Самоцвет» с элементами селективного резонатора.

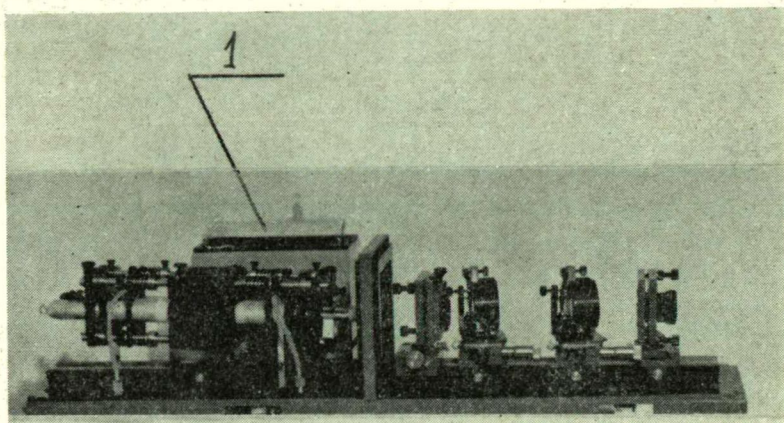


Рис. 3. Внешний вид лазерной головки ОКГ «Самоцвет» с элементами селективного резонатора. 1 — сосуд для красителя.

Кварцевая кювета 4 с внутренним диаметром 8 мм и длиной 270 мм выполнена с двойными стенками и клиновыми окошками. Клиновые окошки предусматривают устранение паразитной генерации от наружных поверхностей окошек.

Кювета и импульсные лампы помещены в овальный керсировый отражатель 5. Достоинством керсировой керамики является очень высокий коэффициент отражения в широкой спектральной области (95%) и большая световая стойкость, обеспечивающая эффективную и продолжительную работу осветителя.

Раствор красителя из общей емкости 1 (рис. 3) поступает по силиконовой трубке во внутренний канал кюветы и затем, после вспышки, автоматически сливается дозатором в приемный бачок. Такая система замены красителя чрезвычайно проста и выгодно отличается от системы прокачки с замкнутым контуром хорошей воспроизводимостью и стабильностью энергетических и спектральных характеристик генерации, а также не требует больших объемов активного раствора. Отработанный раствор красителя можно использовать повторно, при этом выходная энергия генерации уменьшается не более, чем в 1,5 раза. По наружному каналу кюветы непрерывно прокачивается жидкостный фильтр (дистиллированная вода или раствор сернокислого натрия), который отсекает жесткий ультрафиолет ламп накачки и в значительной мере препятствует фотораспаду активного раствора. Кроме того, непрерывная прокачка фильтра способствует быстрой температурной стабилизации активной среды. Блок прокачки жидкостного фильтра выполнен в виде легкоъемного узла и состоит из роликового насоса, электромагнитного дозатора и приемного бачка для отработанного раствора и расположен в каресе блока питания 2.

Конструкция и оптическая схема прибора обеспечивает три режима работы (А, Б, В), причем настройка на нужный режим работы производится оперативно и не нарушает юстировку оптической системы в целом.

В режиме А селективные элементы в резонаторе отсутствуют, база резонатора ОКГ минимальна и равна 28 см. Сам резонатор образован призмой полного внутреннего отражения (ПВО) 6 и стопой 1 (рис. 2).

Таблица 1

Энергетические и спектральные характеристики ОКГ «Самоцвет» с неселективным резонатором при энергии накачки 1800 Дж

№ (п/п)	Название красителя, растворитель	Концентрация, (г/л)	Порог генерации, (Дж)	Энергия генерации (Дж)	Спектр генерации, (нм)
1.	7-ацетокси-4-метилкумарин, этанол + КОН	0,1 0,2	360	1,8	450—463
2.	Эскулин, этанол + КОН	0,14 0,2	300	3,0	462—473
3.	7-ацетокси-3,4-диметилкумарин, этанол + КОН	0,1 0,2	300	2,5	466—480
4.	7-ацетокси-3-фенилкумарин, этанол + КОН	0,085 0,2	350	2,5	480—495
5.	3-аминофталимид, этанол	0,3	—	0,3	499—510
6.	3-амино-N-метилфталимид, этанол	0,3	—	0,5	510—520
7.	3,6-диамино-N-метилфталимид, диоксан	0,3	—	0,4	540—556
8.	Незамещенный родамин, этанол	0,037	150	1,6	560—573
9.	Родамин Ж, этанол	0,04	50	7,0	580—594
10.	Родамин В, этанол	0,043	130	2,7	600—618
11.	Родамин 3В; этанол	0,045	100	3,6	620—635
12.	Родамин 101, этанол	0,04	400	1,0	639—650
13.	Крезил-фиолет, этанол	0,05	250	2,6	660—685
14.	Нильский голубой, этанол	0,05	—	0,8	700—720

Энергетические и спектральные характеристики излучения ОКГ «Самоцвет» для неселективного резонатора приведены в таблице I. Здесь указаны оптимальная концентрация красителя, порог, энергия и спектральная область генерации. Из таблицы видно, что спектральный диапазон 450—720 нм перекрывается 14 красителями различных классов (кумарины, фталимиды, родамины, оксазины).

Указанные соединения были выбраны из большого числа красителей как наиболее эффективные, обеспечивающие получение в данной области спектра импульсов генерации с энергией от 0,3 до 7 Дж при выходной мощности 0,1—0,7 Мвт. Угловая расходимость генерируемого излучения составляет при этом 20—30°.

Сравнение генерационной эффективности данных соединений в различных растворителях показало, что наиболее приемлемым является этанол. Как правило, в этаноле красители хорошо растворяются, люминесцируют и генерируют, он дешев и менее токсичен по сравнению с другими органическими растворителями.

Исключение составляет 3,6-диамино-*N*-метилфталимид, для которого в качестве растворителя выбран диоксан, обеспечивающий при сравнимой с этанольным раствором генерационной эффективности расположение спектра генерации в более коротковолновой области (540—556 нм).

В случае режима Б резонатор включает один блочный интерферометр с базой 3 мкм и телескоп с увеличением $3\times$. В данном режиме поворотом интерферометра осуществляется плавная перестройка спектра генерации шириной 5—8 Å практически во всей видимой области при максимальной выходной энергии генерации до 2 Дж (родамин Ж). Средняя пиковая мощность генерации в этом режиме равна 200 кВт.

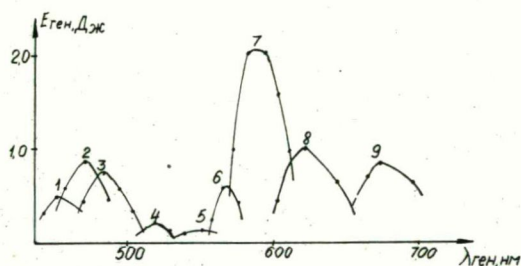


Рис. 4.

а) зависимость энергии генерации от положения спектра при перестройке интерферометром Фабри-Перо с базой 3 мкм (режим Б) для 7-окси-4-метулкимарина (1), эскулина (2), 7-ацетокси-3-фенилкумарина, 3,6-диамино-*N*-метилфталимида (5), незамещенного родамина (6), родамина Ж (7), родамина 3В (8), крезилфиолета (9).

б) перестройка спектра генерации родамина Ж.

Зависимость энергии генерации от положения спектра при перестройке для наиболее эффективных красителей в указанном режиме приведена на рис. 4а. Здесь же (рис. 4б) приведен пример перестройки спектра генерации родамина Ж.

Малая энергия генерации в спектральном диапазоне 500—550 нм связана с отсутствием эффективных красителей для данной области спектра. Следует, однако, отметить, что при перестройке лазера по спектру мощность излучения изменяется значительно слабее, чем энергия, в связи с тем, что уменьшение энергии генерации сопровождается сокращением длительности импульса.

С целью дальнейшего сужения спектра генерации в рассматриваемый селективный резонатор помещается дополнительно еще один интерферометр Фабри-Перо блочной конструкции с базой 100—150 мкм. (Режим В). При такой базе эталона расстояние между максимумами пропускания $\left(\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2h}\right)$ больше начальной ширины спектра генерируемого излучения ($\delta\lambda = 5-8 \text{ \AA}$), что необходимо для получения одной узкой линии генерации. Использование дисперсионного резонатора с двумя интерферометрами Фабри-Перо позволило получить спектральную линию генерации шириной $(1-4) \cdot 10^{-2} \text{ \AA}$.

При соблюдении оптимальных условий для родамина Ж получена линия генерации $0,015 \text{ \AA}$ при выходной энергии 0,3 Дж, что соответствует спектральной плотности излучения 200 Дж/нм.

Перестройка узкой линии генерации в широких пределах осуществляется поворотом обоих интерферометров. Для примера на рис. 5а показана плавная перестройка узкой линии генерации родамина Ж при повороте интерферометра с большей базой. Интерференционная картина генерируемой линии приведена на рис. 5б.

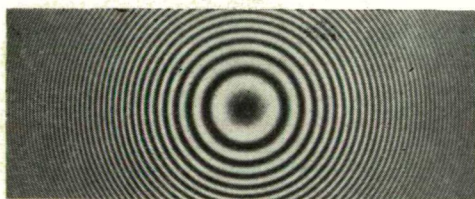
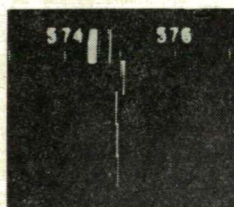


Рис. 5.

- а) Плавная перестройка узкой линии генерации родамина Ж при повороте интерферометра с базой $h = 100 \text{ мкм}$;
 б) интерферограмма линии генерации родамина Ж.

В процессе разработки прибора существенное внимание уделялось повышению надежности работы элементов и узлов лазера и обеспечению стабильности его характеристик, в том числе детально были исследованы различные схемы и элементы конструкции резонатора ОКГ. Исследования по оптимизации параметров неселективного резонатора показали, что использование стопы и призмы ПВО в качестве отражателей оказывается более приемлемым, чем зеркал с диэлектрическим покрытием. Так, в номинальном режиме работы лазера ($E_{\text{ген}} = 6-7 \text{ Дж}$, родамин Ж) уже через несколько вспышек наблюдаются

следы разрушения диэлектрических покрытий как на «глухом», так и на выходном зеркале. Первоначально разрушение наблюдается в отдельных точках зеркал, что может быть связано с явлением самофокусировки лазерного излучения, с оптической неоднородностью активной среды, приводящей к возникновению генерации в отдельных нитях и, наконец, с неоднородностью диэлектрических покрытий. «Выгорание» отражающего покрытия сопровождается падением генерационной эффективности лазера, приводит к резкому уменьшению срока службы и невоспроизводимости его параметров.

Применение стопы и призмы в резонаторе ОКГ позволяет не только избежать этих недостатков, но и обеспечивает нужный коэффициент отражения практически во всей спектральной области работы прибора.

С целью получения узких спектральных линий генерации при обеспечении максимальной выходной энергии и спектральной плотности излучения исследовались различные схемы дисперсионных резонаторов. В экспериментах использовались плоская (1200 штр/мм, коэффициент отражения в первом левом порядке $R=70\%$) и сферическая (1200 штр/мм, $R=70\%$, радиус кривизны $r=50$ см) дифракционные решетки.

Коэффициент отражения выходного зеркала резонатора равнялся 50%. С целью предотвращения выгорания решетки, более полного использования ее поверхности и уменьшения угловой расходимости генерируемого излучения в резонатор лазера помещался трех или пятикратный телескоп.

Исследования показали, что значительное сужение спектра генерации в резонаторе с дифракционной решеткой (от 60 до 4 Å) может быть получено только при близких к пороговым уровням накачки или при больших базах резонатора (>150 см). При малых базах резонатора и больших превышениях накачки над порогом заметного сужения спектра генерации не наблюдается, а при наличии в резонаторе ОКГ телескопа ширина спектра генерации даже возрастает. Введение дополнительно в резонатор дисперсионной призмы не привело к заметному сужению спектра. По нашему мнению, объяснить данные результаты можно следующим образом. Сужение спектра генерации в селективном резонаторе с дифракционной решеткой происходит за счет разложения лучей, соответствующих различным длинам волн, по разным направлениям к оси резонатора. При этом ширина генерируемого спектра будет определяться как дисперсией дифракционной решетки, так и критичностью пороговых условий генерации по отношению к направлению лучей в резонаторе. Чем меньше угловой интервал, для которого выполняются условия генерации, тем меньше ширина спектра генерируемого излучения.

В случае сильных термооптических искажений раствора лучи, проходящие через разные области активной среды, отклоняются под разными углами к оси резонатора. В условиях резонатора с плоскими зеркалами это приводит к росту краевых потерь генерации. Использование дифракционной решетки, однако, уменьшает критичность условий генерации к углу распространения излучения, так как для каждого угла падения на дифракционную решетку находится такая длина волны, для которой дифракционное отражение от решетки происходит строго в обратном направлении. Таким образом, после отражения от решетки луч света попадает в ту же область раствора, из которой он вышел и, следовательно, его путь в резонаторе оказывается замкнутым. Это обстоятельство приводит к увеличению угловой расходимости генерируе-

мого излучения и делает применение дифракционных решеток в лазерах такого типа неэффективными.

Гораздо более эффективным оказался селективный резонатор с интерферометром Фабри-Перо. В отличие от дифракционной решетки интерферометр не увеличивает угловую расходимость излучения лазера, а напротив, приводит к угловой селекции генерации, что благоприятствует его использованию в качестве селективного элемента. При наличии интерферометра Фабри-Перо в резонаторе ОКГ генерация может происходить на частотах, соответствующих спектральному положению максимумов пропускания интерферометра. Спектральная ширина линии генерации определяется спектральной шириной максимумов пропускания, которая зависит от коэффициентов отражения пластин и базы интерферометра [2].

Как уже отмечалось, нами использовался блочный интерферометр Фабри-Перо [1] с коэффициентами отражения пластин $R=80\%$ и базой $h=3$ мкм. Расстояние между зеркалами резонатора равнялось 60 см. Для уменьшения угловой расходимости падающего на интерферометр излучения, а также для предотвращения разрушения диэлектрических покрытий эталона и «глухого» зеркала в резонатор ОКГ помещался трехкратный телескоп. Телескоп настраивался таким образом, чтобы обеспечить минимальную угловую расходимость генерации. При этом в неселективном резонаторе ширина спектра излучения значительно уменьшалась, а энергия возрастала. Например, в случае используемого нами лазера энергия генерации ($E_{\text{ген}}=1,5$ Дж, ширина спектра $\delta\lambda_{\text{ген}}=200$ Å, этанольный раствор родамина Ж) введение в резонатор телескопа привело к увеличению энергии генерации в два раза, сужению спектра до 80 Å и к уменьшению угловой расходимости в 1,5 раза. Исследования показали, что внесение в резонатор лазера одного интерферометра Фабри-Перо с базой 3 мкм в присутствии телескопа (режим Б) позволяет значительно (от 80 до 5—8 Å) сужить спектр генерации при энергетических потерях не более 30—40%.

Исследования и испытания двух экспериментальных образцов ОКГ «Самоцвет» показали его достаточно высокую надежность, стабильность характеристик и удобство в эксплуатации. Каждый из экспериментальных образцов наработал в процессе испытаний более 2 тыс. вспышек при различных режимах. В случае работы в одном и том же режиме в течение 150...200 вспышек юстировки оптических элементов, как правило, не требовалось.

В приборе применяются серийные импульсные лампы ИФП—5000, которые являются наименее долговечными элементами прибора. При предельных энергиях разряда около 2000 Дж необходима замена ламп через 150...200 вспышек. При замене с такой периодичностью у нас в процессе испытаний не наблюдалось ни одного взрыва ламп. В случае использования ламп ИФП—5000 с начальным давлением ксенона 50 мм рт. ст. их долговечность возрастает в 2,5...3 раза. Светоотдача ламп при давлении ксенона практически не отличается от светоотдачи стандартных импульсных ламп (с давлением 300 мм рт. ст.), что подтверждается также результатами работы [3].

Экспериментальный ОКГ «Самоцвет» может быть взят за основу при разработке промышленных образцов перестраиваемых лазеров на красителях, которые могут быть применены для разделения изотопов, получения сверхчистых веществ, зондирования атмосферы, медицинских целей и в целом ряде других областей науки и техники.

Литература

- [1] Ануфрик, С. С., А. С. Киреев, И. А. Морозов, Е. В. Панько, Н. В. Стриженок, С. Д. Тушина, В. С. Моткин: ЖПС 25, 557 (1976).
- [2] Королев, Ф. А.: Теоретическая оптика, Изд. «Высшая школа», Москва, 1966.
- [3] Басов, Ю. Г., С. А. Болдырев, Д. Н. Токарев: ЖПС 34, 419 (1976).

A HIGH EFFICIENCY FLASHLAMP PUMPED DYE LASER

*S. S. Anufrik, S. P. Zbirko, I. A. Morozov, V. A. Mostovnikov,
V. S. Motkin, A. N. Rubinov and A. M. Rusetzki*

In the present paper investigations are described to find an experimental model of the high efficiency tunable dye laser, pumped by commercial flashlamps. The fundamental parameters of a realised dye laser and its properties under different conditions are given.