

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОЦВЕТНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ В СИСТЕМЕ ДИСТАНЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ПО ИХ СПЕКТРАЛЬНЫМ ПОРТРЕТАМ

М.В. Сахаров, М.Ф. Колдунов, А.А. Воробьев, М.В. Конюхов
(Военная академия РВСН им. Петра Великого,
АНО «Научно-инновационный центр ракетно-космических
технологий»)

Обоснованы принципы построения и функционирования системы дистанционного распознавания объектов по их спектральным портретам. Предложено использовать для зондирования удалённых объектов многоцветный лазерный излучатель с набором циклически сменяемых активных элементов из композита «нанопористое стекло-полимер» с внедрёнными органическими красителями, накачиваемых второй гармоникой YAG:Nd³⁺-лазера. Результаты работы могут быть использованы при разработке перспективных систем дистанционного зондирования поверхности Земли и экологического мониторинга.
Ключевые слова: система технического зрения, многоцветный лазерный излучатель, дистанционное распознавание, спектральный портрет.

Введение. Системы технического зрения (СТЗ) предназначены для дополнения или замены человека в областях деятельности, связанных со сбором и анализом зрительной информации. Они востребованы в робототехнике, аппаратах аэро- и космической съёмки поверхности Земли, системах управления движением воздушного, автомобильного и др. транспорта, системах экологического мониторинга. В состав типовой СТЗ входят: оптическая система, матричный фотоприемник «смотрящего» типа, электронный блок управления, обработки и ввода изображения в память ЭВМ или спецвычислителя, программное обеспечение сбора и обработки изображений, система визуализации полученной информации.

Важнейшей задачей, возлагаемой на СТЗ, является дистанционное распознавание объектов. Одним из основных существенных недостатков существующих СТЗ является низкая информативность регистрируемой информации, обусловленная поступлением на чувствительные элементы матричного фотоприемного устройства (МФПУ) интегрального по спектру изображения объекта. Это осложняет решение задачи распознавания объектов, находящихся на некотором расстоянии от точки съёмки, особенно в сложных метеорологических условиях, темное время суток и при отсутствии средств измерения дальности до объекта наблюдения. Приведенные осложнения условий съёмки приводят к «размытости» контура наблюдаемых объектов, ухудшению контраста, сложной структуре фона, на котором наблюдается объект, несоответствию масштабов наблюдаемого и предварительно полученного эталонного изображений объекта. Кроме того, на момент наблюдения ракурс объекта может не соответствовать ракурсу эталонного изображения.

Описанный недостаток может быть частично устранен вводом в состав СТЗ лазерного дальномера. При использовании лазерного дальномера часть зондирующего лазерного излучения рассеивается на наблюдаемом объекте в обратном направлении. Это излучение собирается оптической системой на матричном фотоприемнике, преобразующем его в электрические сигналы, пропорциональные интенсивности принятого оптического излучения. Электронный блок управляет параметрами и процессом съёмки, определением дальности до объекта, обработкой и вводом изображения в память ЭВМ или спецвычислителя. Измеренная дальность до объекта позволяет выполнить масштабирование его регистрируемого изображения для сопоставления с эталонными изображениями.

Метод лазерной локации применяется для определения экологического состояния воздуха, земли, леса; контроля посевов сельскохозяйственных культур; инвентаризации природных ресурсов; инвентаризации и реконструкции воздушных линий электропередачи. Изображения, получаемые с использованием лазерных излучателей, обрабатываются программными средствами на основе методов выделения контуров и распознавания объектов (участков изображений) [1].

Такие СТЗ основаны на применении одной-двух длин волн лазерного излучения (как правило 1,06 и 0,53 мкм). Большинство же объектов, представляющих практический интерес, характеризуется своим, присущим только им, спектральным портретом. Поэтому для повышения информативности получения данных о наблюдаемом объекте представляется целесообразным облучение его импульсами лазерного излучения на большем количестве длин волн для последующего накопления изображений объекта на

этих длинах волн (спектрального портрета) и сопоставления его с эталонными спектральными портретами объектов, заблаговременно полученными и хранящимися в банке данных.

Таким образом, актуальной является задача разработки принципов построения и функционирования системы дистанционного распознавания объектов на основе многоцветного лазерного излучателя, решение которой и посвящена настоящая статья.

Для создания многоцветного лазерного излучателя существенно, что в настоящее время созданы [2] основы элементной базы, позволяющие разработать компактную лазерную систему с перестраиваемой длиной волны в широкой спектральной области от 360 до 800 нм. Элементная база для создания систем регистрации спектров также достаточно хорошо разработана.

Создание системы дистанционного распознавания объектов требует решения комплекса задач, в частности, создания перестраиваемой в указанном диапазоне длин волн лазерной системы, сопряженного с ней блока регистрации спектральных портретов, решающего блока и блока управления, согласующего работу всех остальных блоков устройства.

Отдельный вопрос, заслуживающий внимания, – это выбор источника накачки, генерирующего лазерное излучение на длине волны 532 нм. В настоящее время оптимальным выбором с точки зрения эксплуатационных и массогабаритных характеристик является $YAG:Nd^{3+}$ -лазер с полупроводниковой накачкой и удвоением частоты. Создание источника накачки с высокой частотой повторения импульсов и большой энергией представляет достаточно сложную задачу. Но поскольку для создания системы дистанционного распознавания объектов достаточно умеренной энергии лазерного излучения (до 0,1 Дж с частотой повторения импульсов порядка 100 Гц), то это вполне решаемая задача.

Для построения систем анализа спектра отражения лазерного зондирующего канала может быть предложено несколько эффективных схем, которые могут быть реализованы на существующей элементной базе.

С целью согласования излучения лазерного источника и системы анализатора спектра система дистанционного распознавания объектов должна быть оснащена автоматизированной системой управления на основе ЭВМ с элементами сопряжения и специализированным программным обеспечением.

Исследование характеристик композита «нанопористое стекло-полимер». Наибольшую сложность представляет создание надёжного много-

цветного лазерного излучателя, способного безотказно работать на борту носителя (например космического аппарата) или в полевых условиях. Для этого предлагается использовать активные элементы из композитного материала «нанопористое стекло-полимер» (НПСП), активированного лазерными красителями. Этот относительно недавно созданный материал [3, 4] обладает уникальными характеристиками: высокой механической и лучевой прочностью (более 10^9 Вт/см²), высоким термооптическим качеством, позволяющим работать в режиме с большой частотой повторения импульсов, и др. Лазерные элементы, изготовленные из этого композита, показали высокий КПД генерации (в диапазоне длин волн 540 – 580 нм до 80%, в диапазоне 580 – 660 нм – не менее 32%).

Заметим для сравнения, что наилучшее значение КПД излучения, полученное на кристалле сапфира, активированного титаном, в диапазоне 350 – 500 нм составило не более 8%.

Существенно, что свойства композитного материала устойчивы к сильным вариациям внешних условий: лазерный элемент, изготовленный из него, работоспособен в широкой области температур и влажности. Не менее важную роль играет и то, что лазерный элемент, изготовленный из композита, позволяет создать компактный многоцветный лазерный излучатель с перестройкой длины волны в широком диапазоне. К настоящему времени на основе этого элемента получена генерация с высоким КПД в области длин волн 540 – 660 нм [4, 5]. При этом нижняя граница указанного диапазона длин волн обусловлена длиной волны накачки – 532 нм. Переход к накачке третьей гармоникой лазера $YAG:Nd^{3+}$ (длина волны 355 нм) позволит расширить этот диапазон до области от 360 до 800 нм.

Для указанной области длин волн эффективные и устойчивые красители, применяемые в жидких растворах, хорошо известны. Заметим, что, как показано для области 540 – 660 нм, композит НПСП – единственная твердотельная матрица, эффективность генерации красителя в которой не уступает его эффективности в жидком растворе [6]. Полученные к настоящему времени результаты по генерации лазерного излучения на основе активного элемента из композита НПСП позволяют сделать вывод о том, что его разработка привела к созданию нового класса перестраиваемых лазеров.

Композит НПСП был предложен в качестве материала лазерной оптики в 1988 г. [2] с целью совершенствования свойств серийно выпускаемого полимерного затвора ПЛЗ МЗ 403 [7]. К недостаткам оптического полимера, основы этого затвора,

следует отнести, прежде всего, деформацию формы поверхности при изменении температуры и влажности окружающей среды. Кроме того, для оптических полимеров характерно низкое термооптическое качество, следствием чего являются искажения пучка лазерного излучения при нагреве лазерного затвора излучением в процессе работы, и, как следствие, срыв генерации в частотном режиме. Наконец, полимерный материал требует специальной технологии оптической обработки как шлифовки, так и полировки.

Для исключения негативных свойств оптического полимера его следовало поместить в жесткий каркас, ограничивающий деформацию его поверхности. Решение этой задачи состояло в формировании триплекса – полимерной пленки, зажатой между стеклянными пластинами. Такой подход был реализован в затворе ПЛЗ МЗ 408 [8].

Другое, более сложное решение задачи создания жесткого каркаса для полимера, состояла в его синтезе в порах нанопористого стекла, т. е. создания композита НПСП. Важно, что к этому времени технология получения нанопористого стекла была хорошо отработана [9 – 11]. Сложность формирования композита НПСП, главным образом, связана с отработкой технологии синтеза полимера в порах нанопористого стекла (НПС). При синтезе полимер дает усадку, так что в композите могут формироваться поры, приводящие к сильному светорассеянию.

После разработки технологии композита НПСП стало ясно, что этот материал является перспективным для создания различных элементов лазерной оптики. Это привело к подробному исследованию его свойств, а также свойств изготовленных из него лазерных элементов [12 – 15].

Преимущества композита НПСП становятся очевидными при сопоставлении его свойств со свойствами предшественника – оптического полимера модифицированного полиметилметакрилата (МПММА), изготовленного из той же исходной мономерной смеси, что и полимерная компонента композита (табл. 1).

Нанопористое стекло изготавливается из составов, которые в процессе ликвации формируют две взаимно проникающие сетки. Примером состава, приводящего к такому строению стекла после его термической обработки, является $59,0\text{SiO}_2 \times 33,2\text{B}_2\text{O}_3 \times 4,0\text{Na}_2\text{O} \times 3,8\text{K}_2\text{O}$ (цифрами перед соединением указано его содержание в стекле в весовых процентах).

Для получения нанопористого стекла химически нестойкую натрийборатную фазу удаляют травлением кислотой. Существенно, что особенность строения стекла (цепочное расположение соедине-

ний B_2O_3) позволяет удалить из обогащенной SiO_2 фазы в процессе травления большую часть B_2O_3 . Полученные пористые стекла обычно содержат SiO_2 (93 – 99%), B_2O_3 (2 – 5%), Na_2O и K_2O (0,05 – 0,5%). Простой способ определения распределения пор по размерам основан на исследовании изотермической кривой адсорбции паров воды в НПС, так называемый метод водной порометрии. В результате многочисленных исследований этим методом распределения пор в образцах НПС полученных согласно описанной выше процедуре установлено, что оно узкое и одномодальное. Пример такого распределения, полученного методом водной порометрии, для нанопористого стекла с исходным составом $59,0\text{SiO}_2 \times 33,2\text{B}_2\text{O}_3 \times 4,0\text{Na}_2\text{O} \times 3,8\text{K}_2\text{O}$ показан на рис. 1.

Таблица 1

Основные характеристики НПСП и МПММА

Характеристика	МПММА	НПСП
Растворимость органических соединений, М/л	$\sim 10^{-2}$	$\sim 10^{-2}$
Область оптической прозрачности, нм	300 – 1600	300 – 1600
Светорассеяние	Низкое	Низкое
Термооптическое качество, Вт/м	$\sim 10^3$	$\sim 10^5$
Лазерная прочность *, режим 1×1, Дж/см ²	~60	~70
Лазерная прочность *, режим 1×200, Дж/см ²	~5	~30
Микротвердость, Н/мм ²	~100	~2000
Устойчивость при климатических изменениях	Низкая	Высокая

* При длительности импульса 10 нс излучения с длиной волны 1063 нм.

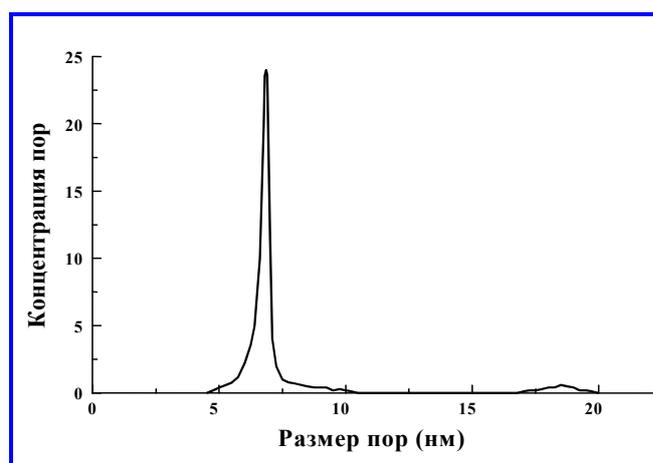


Рис. 1. Распределение пор по размерам (о. е.) в нанопористом стекле, полученное методом водной порометрии. Состав исходного стекла – $59,0\text{SiO}_2 \times 33,2\text{B}_2\text{O}_3 \times 4,0\text{Na}_2\text{O} \times 3,8\text{K}_2\text{O}$

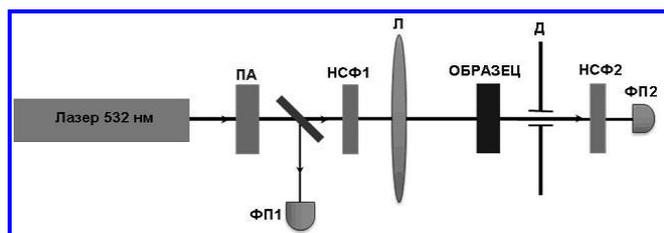


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования разрушения

Исследование лазерного разрушения композита НПСП выполнялось на длинах волн 532 и 1063 нм. Схема экспериментальной установки, разработанная для исследования разрушения на длине волны 532 нм, показана на рис. 2. В качестве источника излучения использовалась вторая гармоника лазера YAG:Nd³⁺, работающего в режиме одной поперечной моды. Распределение интенсивности излучения в пучке имело гауссов профиль. Длительность импульса составляла 26 ± 1 нс по уровню 0,5.

Измерение энергии излучения выполнялось фотоприемниками, изготовленными на основе фотодиода ФД-24, которые калибровались с точностью $\pm 5\%$, а также фотодиодным приемником PD10 Ophir.

Исследования разрушения на длине волны 532 нм проводились в режиме 1×1 . Излучение лазера фокусировалось на образец линзой Л с фокусным расстоянием 60 мм. Энергия импульса плавно регулировалась поляризационным аттенюатором (ПА) и нейтральными светофильтрами НСФ1 и НФС2.

Фотоприемник ФП2, перед которым установлена диафрагма Д, регистрировал излучение, прошедшее через образец. Предварительные исследования показали, что разрушение всегда сопровождается резким падением показаний фотоприемника ФП2, что и было принято за критерий разрушения.

Отличия в схеме экспериментальной установки для исследований лазерного разрушения на длине волны 1063 нм касались конкретных параметров: длительность импульса 15 ± 1 нс по уровню 0,5; излучение фокусировалось в образец композита линзой с фокусным расстоянием 100 мм. Исследования выполнялись как в режиме 1×1 , так и в режиме 200×1 , причём как в режиме одной поперечной моды, так и в многомодовом режиме.

В результате исследований установлено, что в режиме одной поперечной моды на обеих длинах волн (1063 и 532 нм) наблюдаются пространственные вариации лазерной прочности. Их наличие свидетельствует о доминировании несобственного механизма лазерного разрушения. Зафиксированные пороговые плотности энергии лазерного разрушения:

$$W_{th}^1 \cong 70 \text{ Дж/см}^2;$$

на длине волны 532 нм

$$W_{th}^1 \cong 35 \text{ Дж/см}^2.$$

Таблица 2

Лазерная прочность материалов

Образцы	Фильтрация мономера	Наличие низкомолекулярной добавки	Порог разрушения в режиме 1×1 , Дж/см ²	Порог разрушения в режиме 1×200 , Дж/см ²
МПИММА	–	–	17	1,6 – 1,9
МПИММА	+	–	63	2,2 – 2,6
МПИММА	–	+	15	5,4 – 6,3
Композит	–	–	58	31 – 38
Композит	+	–	76	35 – 43
Композит	–	+	56	25 – 28

Исследовано также влияние на пороги лазерного разрушения композита НПСП технологических факторов – предварительной очистки мономерного состава и низкомолекулярной добавки. Эти исследования выполнялись в многомодовом режиме работы лазера на длине волны 1063 нм. Одновременно выполнялось измерение порогов разрушения контрольных образцов из МПММА синтезированных из того же мономерного состава, который вводился в композит. Результаты этих исследований представлены в табл. 2. Сопоставление данных таблицы показывает, что порог лазерного разрушения композита как в режиме 1×1 , так и в режиме 1×200 , превосходит порог разрушения оптического полимера, специально разработанного для лазерных применений.

Наиболее значительное различие, более чем на порядок, имеет место в режиме 1×200 , что имеет принципиальное значение для ресурса работы лазерного элемента. Существенно, что ни предварительная очистка мономера, ни введение низкомолекулярной добавки в состав полимерной композиции не оказывают значительного влияния на величину порога разрушения композита, тогда как для объемного полимера такое влияние велико.

Исследование эффективности генерации от оптической плотности лазерного элемента (ЛЭ) $\eta(D)$ выявило её немонотонную зависимость. Для лазерного элемента, активированного функциональным органическим соединением (ФОС) ПМ-597, эта зависимость показана на рис. 3. Существование оптимальной плотности D_m , отвечающей максимуму на зависимости $\eta(D)$, обусловлено неоднородностью возбуждения ЛЭ. В условиях продольной накачки инверсия рабочих уровней уменьшается от входного торца ЛЭ к выходному.

Если $D > D_m$, область ЛЭ у выходного торца остается «непрокачанной», в ней доминируют процессы реабсорбции излучения генерации, приводящие к падению η . В области $D < D_m$ излучение накачки насыщает переход $S_0 \rightarrow S_1$ (здесь S_0 и S_1 – соответственно основное и первое возбужденное синглетные состояния ФОС), во всей области ЛЭ. В таких условиях излучение накачки либо поглощается в результате переходов $S_1 \rightarrow S_n$ (где S_n – высоко возбужденное электронное состояние), либо проходит сквозь ЛЭ.

Каждый из этих процессов приводят к падению эффективности генерации. При $D = D_m$ поглощение излучения накачки и реабсорбции генерируемого излучения сбалансированы.

Приведенные далее значения эффективности генерации и ресурса соответствует, если не оговорено противное, оптимальному лазерному элементу в данном резонаторе, т. е. отвечают максимуму зависимости $\eta(D)$, т. е. $\eta_m(D) = \eta(D_m)$. Величина ресурса $N_{0,7}$, также определена для ЛЭ, оптическая плотность которого равна D_m .

Результаты исследования эффективности генерации и ресурса работы ЛЭ, активированных ФОС пирометинового и фенолеминового рядов, представлены в табл. 3.

В табл. 3 обозначены: λ_g – длина волны генерации; D_o – оптическая плотность ЛЭ; η_m – эффективность генерации; $N_{0,7}$ – ресурс работы ЛЭ при частоте следования импульсов накачки 33 Гц. Приведенные в табл. 3 величины $N_{0,7}$ получены при частоте повторения импульсов 33 Гц. Снижение частоты следования импульсов до $3^{2/3}$ Гц не приводит к изменению эффективности генерации, тогда как ресурс работы ЛЭ увеличивается в 2 – 3 раза.

Отметим, что в ряде случаев представляет интерес увеличение ресурса работы лазерного элемента за счёт снижения эффективности преобразования излучения. С этой целью изготовлен композитный ЛЭ, активированный красителем ПМ-597 толщиной 3,5 мм с высокой оптической плотностью 23 на длине волны 532 нм. Максимальная эффективность генерации этого элемента составила величину 65% при плотности мощности излучения накачки 32 МВт/см^2 , а его ресурс работы превосходил 10^6 импульсов при облучении одной фиксированной области с частотой повторения импульсов $3^{2/3}$ Гц. Уменьшение оптической плотности ЛЭ до 13 ведет к увеличению эффективности генерации до 72% и падению ресурса работы до 10^6 импульсов при той же частоте их следования. Эффективность генерации излучения красителем в растворе выше, чем в твердой матрице. В связи с этим одновременно с измерением эффективности генерации в композите выполнялись измерения эффективности генерации тех же красителей в мономерной смеси и этанольном растворе.

Все исследования в жидких растворах проводились на том же оборудовании, при частоте повторения импульсов $3^{2/3}$ Гц. В результате было установлено, что эффективность генерации композитного лазерного элемента в пределах точности эксперимента совпадает с эффективностью генерации жидкостным элементом с тем же ФОС.

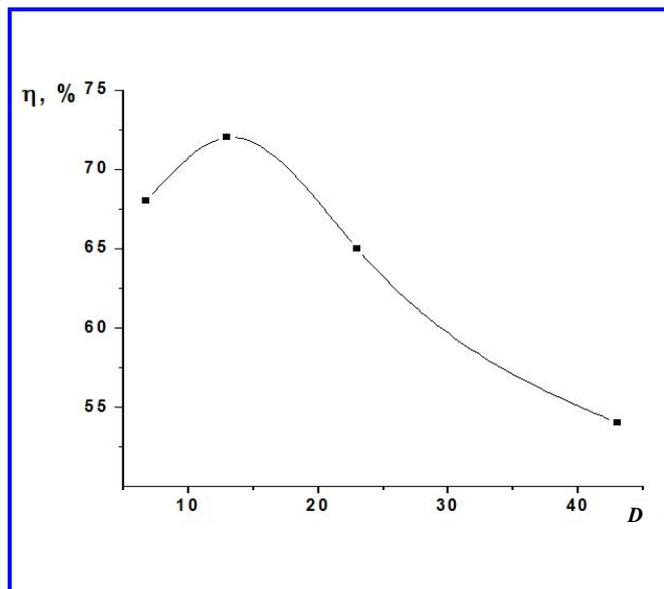


Рис. 3. Зависимость эффективности преобразования η в лазерных элементах на основе композита НПСП с красителем ПМ-597 от их оптической плотности D при накачке второй гармоникой одномодового YAG:Nd³⁺-лазера с плотностью мощности импульса $I_p = 30 \text{ МВт/см}^2$

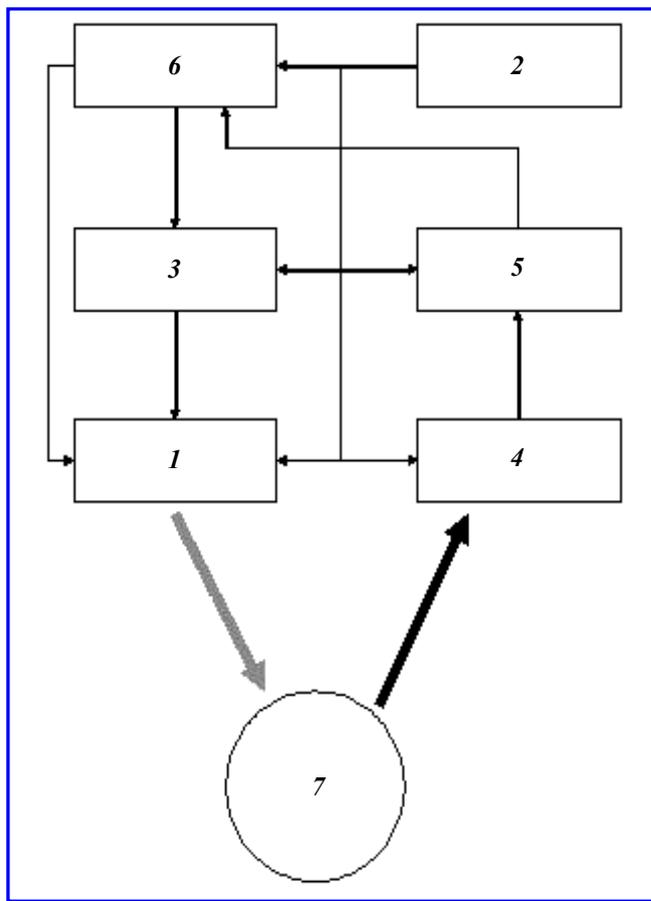


Рис. 4. Структурная схема системы дистанционного распознавания объектов по их спектральному портрету

Таблица 3

Результаты исследования эффективности генерации и ресурса работы ЛЭ, активированных ФОС

Характеристика	ПМ567	ПМ580	ПМ597	ПМ650	Ф512	Ф510	Ф640
$\lambda_g, \text{ нм}$	562	561	570	625	595	614	642
D_o	8,8	12	13	1,6	5,8	10	4,3
$\eta_m, \%$	55	55	72	33	42	30	35
$N_{0,7} \times 10^3$	40	51	340	8	30	14	16

При частоте повторения импульсов накачки 33 Гц эффективность генерации в жидкостном элементе падает, тогда как в композитном ЛЭ остается неизменной.

Проведенные экспериментальные исследования и анализ их результатов позволяет сделать заключение о возможности использования подобных лазерных элементов в многоцветном лазерном излучателе с дальнейшим применением его в системе дистанционного распознавания объектов.

Принципы построения и функционирования системы дистанционного распознавания объектов по их спектральным портретам. На рис. 4 показана разработанная структурная схема системы дистанционного распознавания объектов по их спектральным портретам.

Многоцветный лазерный излучатель 1, вариант устройства которого описан в [17], предназначен для облучения объекта, находящегося на удалении, импульсами лазерного излучения с

циклически сменяемой длиной волны. Блок формирования и наведения лазерного излучения 3 формирует пучок лазерного излучения и наводит его на объект 7. Блок входной оптики 4 принимает отражённые от объекта импульсы лазерного излучения, пропускает их через циклически сменяемые интерференционные фильтры, согласованные по длине волны с принимаемым импульсом отражённого от объекта лазерного излучения, и проецирует полученное изображение на матричное фотоприёмное устройство, которое оцифровывает поступающие изображения объекта, полученные на соответствующих длинах волн, и передает их в блок распознавания 5.

Блок распознавания, построенный на базе ЭВМ, формирует спектральный портрет удалённого объекта (накапливает изображения объекта, полученные на соответствующих длинах волн лазера с фиксацией его пространственного положения и удаления, усредняет, при необходимости, полученные данные по нескольким циклам измерений для исключения влияния случайных факторов), по заложенному в ЭВМ алгоритму распознавания проводит его сравнение с эталонными спектральными портретами типовых объектов, хранящихся в ЭВМ в банке спектральных портретов, и принимает решение о степени их соответствия.

Необходимым условием для функционирования всех блоков является наличие электрического питания, обеспечиваемого блоком питания 2. Для согласования работы всех блоков предусмотрен блок управления 6.

Выводы. В данной статье разработаны принципы построения и функционирования системы дистанционного распознавания объектов по их спектральному портрету, включающей многоцветный лазерный излучатель с набором циклически сменяющихся активных элементов, выполненных из композита НПСП, активированного красителями. Приведенные результаты исследования характеристик композита НПСП свидетельствуют о несомненных преимуществах его использования для создания многоцветных лазерных излучателей бортового базирования. Разработанные принципы могут быть использованы при разработке ряда перспективных систем с улучшенными показателями эффективности: дистанционного зондирования поверхности Земли, экологического мониторинга, а также при решении ряда других прикладных задач,

требующих использования высокоинтеллектуальных СТЗ.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 год.

Литература

1. Козинцев В.И. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды / В.И. Козинцев, В.М. Орлов, М.Л. Белов [и др.]; под ред. В.Н. Рождественна. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 528 с.
2. АС 1814475 / С.М. Долотов, М.Ф. Колдунов [и др.] / – Оpubл. 1988.
3. Композит микропористое стекло-полимер: новый материал для твердотельных лазеров на красителях. I. Свойства материала / Г.Р. Алдэг, С.М. Долотов, М.Ф. Колдунов [и др.] // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30. – № 11. – С. 954 – 958.
4. Композит микропористое стекло-полимер: новый материал для твердотельных лазеров на красителях. II. Лазерные характеристики / Г.Р. Алдэг, С.М. Долотов, М.Ф. Колдунов [и др.] // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30. – № 12. – С. 1055 – 1059.
5. Эффективный твердотельный лазер на основе композита нанопористое стекло-полимер, активированного красителями феналеминового ряда (область генерации 600 – 660 нм) / С.М. Долотов, М.Ф. Колдунов, Я.В. Кравченко [и др.] // Квантовая электроника. – 2002. – Т. 32. – № 8. – С. 669 – 674.
6. Сравнительные исследования лазерных свойств красителей с твердой матрице и жидких средах / М.Ф. Колдунов, Я.В. Кравченко, А.А. Маненков // Материалы «Международной конференции лазерная физика и применение лазеров». – Минск, 2003. – 14 – 16 мая.
7. Затвор лазерный пассивный типа МЗ-403 ТУ 6-14-498-84 от 01.05.84 г.
8. Затвор лазерный пассивный типа МЗ-408 ТУ 6-14-201-88 от 01.08.88 г.
9. Молчанова О.С. Натриевоборосиликатные и пористые стекла / О.С. Молчанова. – М.: Оборонгиз, 1961. – 162 с.
10. Андреев Н.С. Явления ликвации в стеклах / Андреев Н.С., Мазурин О.В., Порай-Кошиц У.А. [и др.]. – Л: Наука, 1974. – 220 с.
11. Мазурин О.В. Двухфазные стекла: структура, свойства, применение / Мазурин О.В., Роскова Г.П., Аверьянов В.И. [и др.]. – Л: Наука, 1991. – 276 с.
12. The space-angular characteristics of a microsecond solid laser on the basis of a nano-porous glass polymer composite activated with dyes / V. Tarkovsky, S. Anufrik, M. Koldunov [et. al.] // Proc. SPIE. – 2007. – Vol. 6731. – P. 673137 – 673143.
13. Reversible nonlinear absorption in nanoporous glass polymer composite doped with functional dyes: experiment and background model / L.M. Koldunov, M.F. Koldunov,

A.V. Petuhov [et. al.] // Technical digest, ICONO/LAT 2010. – Kazan, 2010. – 23 – 26 august.

14. Reversible nonlinear absorption in nanoporous glass polymer composite doped with functional dyes: experiment and background model / L.M. Koldunov, M.F. Koldunov, A.V. Petuhov [et. al.] // Proc. SPIE (in press).

15. Nonlinear refraction and nonlinear absorption in nanoporous glass composite activated by functional dyes / L.M. Koldunov, M.F. Koldunov, I.L. Pokotilo [et al.] // Technical digest, ICONO/LAT 2010. – Kazan, 2010. – 23 – 26 august.

16. Optical, structural, and lasing properties of a composite material nanoporous glass filled with an organic dye activated polymer / S.S. Anufrik, M.I. Ichnatouski, M.F. Koldunov [et al.] // Proc. SPIE. – 2007. – Vol. 6735. – P. 67351X – 673516X.

17. Пат. 2293412 RU С1 МПК⁷ Н 01 S 003/07. Портативный многоцветный импульсно-периодический лазерный излучатель с пиротехнической накачкой / М.В. Сахаров, В.Г. Карцидзе, М.В. Конюхов [и др.]; заявитель ГОУ ВПО ВА РВСН им. Петра Великого. – № 2007139051/28; опубл. 10.02.2007.

Поступила в редакцию 03.12.2010

Михаил Викторович Сахаров, канд. техн. наук, доцент, начальник кафедры, т. (495) 698-35-46, e-mail: m_sakharov@mail.ru.

Модест Фёдорович Колдунов, д-р физ.-мат. наук, доцент, т. (495) 698-35-46.

Алексей Александрович Воробьёв, канд. техн. наук, начальник научно-исследовательской лаборатории, т. (495) 698-35-46.

Михаил Владимирович Конюхов, адъюнкт, т. (495) 698-35-46.