

УДК 535.2+535.343.2

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ, ДОПИРОВАННЫХ ТРЕХЗАРЯДНЫМИ ИОНАМИ ТУЛИЯ, В ФОТОННЫХ ЭХО-ПРОЦЕССОРАХ

*К.Р. Каримуллин, В.А. Зуйков,
Д.А. Христофорова, В.В. Самарцев*

Аннотация

В данной работе исследована возможность использования примесных кристаллов в устройствах оптической фазовой памяти и оптической когерентной обработки информации. Описана экспериментальная установка фотонного эхо-процессора. Обоснован выбор кристаллов, допированных ионами тулия, в качестве носителей информации. Описан импульсный эхо-спектрометрический комплекс, позволяющий исследовать спектры пропускания образцов и проводить поисковые эксперименты по долгоживущему стимулированному фотонному эху. Представлены измеренные спектральные параметры примесных кристаллов.

Введение

Современная информатика в условиях постоянного роста объема, разнообразия и сложности данных во всех областях науки и техники требует новейших систем сбора, накопления, обработки, передачи и регистрации информации. Создание таких информационных систем требует резкого увеличения быстродействия и объема памяти, особенно при их использовании для обработки изображений и полей сигналов. Оптические методы обработки информации, оптическая фазовая память и процессоры на основе явления фотонного эха давно привлекают внимание исследователей. Вычислительные системы подобного рода обладают высоким быстродействием, большой плотностью записи, удобством доступа к информации. Следует отметить, что оптические системы обеспечивают отличную возможность параллельной обработки информации и при этом обладают естественной способностью работать с двумерными данными.

Как правило, проблемы практического характера не дают реализовать весь потенциал оптических процессоров. Основная проблема заключается в трудности ввода и вывода данных с такими скоростями, которые были бы совместимы со скоростью обработки, присущей оптической системе. Кроме того, оптические процессоры, как и любые аналоговые устройства, проигрывают цифровым процессорам по достижимой точности и обладают весьма невысокой гибкостью. Поэтому они приемлемы для ограниченного класса операций обработки. В современных условиях такие проблемы успешно решаются оптоцифровой техникой, сочетающей в себе гибкость цифровых методов и скорость оптических.

Фотонный эхо-процессор (ФЭП) относится к классу многофункциональных аналоговых устройств. Благодаря наличию управляющих сигналов его импульсную характеристику можно программировать в реальном масштабе времени и получать

различные виды обработки – от простого запоминания до интегральных преобразований с желаемым ядром [1]. ФЭП может работать во временной, пространственной и пространственно-временной областях, осуществляя когерентную или некогерентную обработку. ФЭП потенциально предоставляет довольно богатый инструментарий для обработки сигналов и изображений как аналоговыми, так и цифровыми методами, позволяя одновременно комбинировать их в одном устройстве.

В качестве рабочих средств в фотонных эхо-процессорах используют ван-Флековские парамагнетики – примесные кристаллы, активированные некрамеровскими редкоземельными ионами (Pr^{3+} , Eu^{3+} , Ho^{3+} , Tb^{3+} , Tm^{3+} и Pm^{3+}). В этих структурах времена жизни возбужденных сверхтонких подуровней основного состояния при низких температурах оказываются весьма длинными и достигают десятка часов. К числу таких носителей информации относятся следующие кристаллы: Y_2O_3 : Eu^{3+} , YAlO_3 : Eu^{3+} , Y_2SiO_5 : Eu^{3+} , LaF_3 : Pr^{3+} , Y_2SiO_5 : Pr^{3+} , YAG : Tm^{3+} .

На сегодняшний день существует большое количество как теоретических, так и практических разработок и исследований в области оптической когерентной информатики. Однако весьма актуальной проблемой остается поиск новых материалов для построения фотонных процессоров, а также исследование оптимальных режимов работы таких устройств.

Проблема поиска перспективных оптических носителей информации тесно связана с созданием на базе межведомственной лаборатории когерентной оптики (кафедра оптики и нанофотоники Казанского государственного университета и лаборатория нелинейной оптики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского (КФТИ) КазНЦ РАН) экспериментального комплекса фотонного эхо-процессора [2]. Экспериментальная установка ФЭП включает в себя: лазерную систему на основе непрерывного кольцевого титан-сапфирового лазера, систему формирования импульсов с использованием акустооптических модуляторов, электронную систему управления и регистрации сигналов в режиме счета фотонов. К настоящему времени смонтированы и подготовлены к работе указанные выше блоки, проведены тестовые испытания по определению формы оптических импульсов (в том числе и в режиме счета фотонов), производится поиск подходящей активной среды – носителя.

1. Примесные кристаллы в качестве носителей информации

Известно, что группа редкоземельных ионов, имеющих четное количество $4f$ -электронов, внедренных в кристаллическую матрицу с симметрией не ниже аксиальной, обладает уникально большими временами оптической когерентности (временем фазовой памяти) при низкой температуре [3]. Это связано с тем, что их $f-f$ переходы между немагнитными электронными уровнями и оптическая дефазировка будучи магнитными по происхождению, являются результатом ядерно-или электронно-спиновых флуктуаций ядер матрицы или парамагнитных ионов. Эта ситуация хорошо известна для ионов Pr^{3+} и Eu^{3+} , внедренных в матрицу низкой симметрии (см., например, [4]). В этом отношении ион Tm^{3+} , имеющий двенадцать $4f$ -электронов, напоминает хорошо изученный ион Pr^{3+} , обладающий двумя $4f$ -электронами. В отличие от систем с Pr^{3+} и Eu^{3+} , тулий обладает двумя основными преимуществами с точки зрения использования его в устройствах оптической памяти. Во-первых, рабочий переход ${}^3\text{H}_6(1) - {}^3\text{H}_4(1)$ поглощает в спектральной области 800 нм, что позволяет использовать титан-сапфировый лазер, а также широкий класс перестраиваемых коммерческих GaAlAs лазеров в качестве недорогих и удобных источников излучения. Кроме того, поскольку Tm облада-

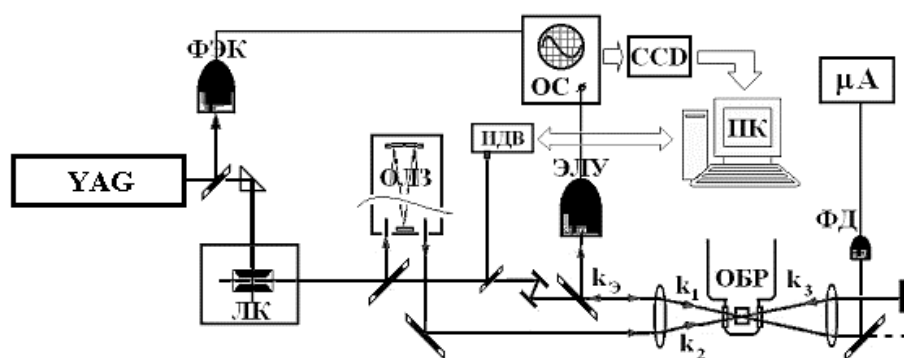


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для исследования кристаллических образцов: YAG – импульсный лазер; ЛК – лазер на красителе; Обр – образец в гелиевом криостате; ОЛЗ – оптическая линия задержек; ЭЛУ – фотоумножитель 14 ЭЛУ-ФК с набором ослабляющих светофильтров; ОС – скоростной осциллограф С7-19; ФЭК – коаксиальный фотоэлемент ФЭК-15 для получения синхроимпульса; ИДВ – спектрометр Spectra Star; CCD – система визуализации импульсов, связанная с компьютером; ФД – фотодиод; $\mu\text{А}$ – микроамперметр

ет ядерным спином $I = 1/2$, у него нет сверхтонкого расщепления в отсутствие внешнего магнитного поля, которое значительно усложняет спектральную картину. Спектроскопические исследования методом выжигания спектральных провалов [5] показали наличие метастабильного уровня 3F_4 с временем жизни ~ 10 мкс. Автором указанной работы было также показано, что на переходе $^3H_6(1) - ^3H_4(1)$ однородная ширина линии излучения составляет всего несколько кГц. Зависимость спада сигналов эха от внешнего магнитного поля и неэкспоненциальный характер этого спада указывают, по-видимому, на то, что уширение обусловлено электронно-ядерным взаимодействием.

В наших экспериментах был исследован ряд кристаллов с примесью ионов Tm^{3+} : алюмоиттриевый гранат $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (YAG), флюорит CaF_2 , форстерит Mg_2SiO_4 , а также двойной фторид натрия и иттрия $\text{Na}_{0,4}\text{Y}_{0,6}\text{F}_{2,2}$ (NYF).

2. Импульсный эхо-спектрометрический комплекс

Экспериментальная установка для исследования примесных кристаллов (рис. 1) представляет собой импульсный эхо-спектрометр на основе лазера на красителе, обеспечивающий формирование и регистрацию сигналов обращенного долгоживущего стимулированного фотонного эха (ДСФЭ). Внесение в схему дополнительных элементов позволило исследовать спектры пропускания примесных кристаллов и наличие сигналов фотонного эха, перестраивая рабочую длину волны с шагом до 0.5 \AA .

Главным узлом установки является лазерная система, состоящая из импульсного YAG-лазера, устройства формирования гармоник излучения (кристалл CDA или DCDA) и перестраиваемого лазера на органическом красителе. Лазер на красителе (спиртовой раствор STYRYL 9M) накачивается второй гармоникой ($\lambda = 532 \text{ нм}$) YAG-лазера. Диапазон перестройки длин волн составляет $780\text{--}840 \text{ нм}$ при ширине линии генерации около 0.1 нм . Пиковая мощность достигает 50 кВт при длительности импульса 10 нс .

Лазерный импульс длительностью 10 нс делится на два импульсных пучка. Первый из них, сфокусированный линзой, направляется непосредственно на ис-

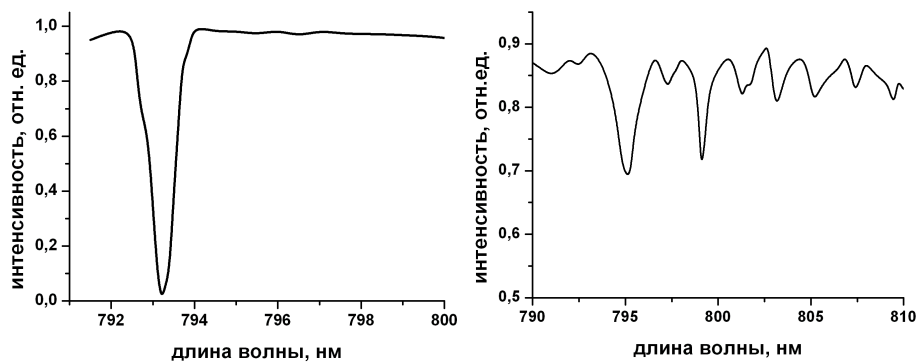


Рис. 2. Спектр пропускания в кристалле $Y_3Al_5O_{12}:Tm^{3+}$ (слева) и в $CaF_2:Tm^{3+}$ (справа) при температуре жидкого гелия

следуемый образец, находящийся в оптическом криостате. Второй импульс, отражаясь от полупрозрачного зеркала, проходит через оптическую линию временных задержек и воздействует на ту же локальную область образца. Третий импульс формируется глухим зеркалом, расположенным за криостатом, в направлении, противоположном действию второго импульса. Второй и третий импульсы действуют практически одновременно, образуя импульс стоячей волны. Таким образом, в образце реализуется режим обращения, и сигнал ДСФЭ формируется в направлении, противоположном действию первого возбуждающего импульса. При этом фотоумножитель освобождается от засветки рассеянным светом возбуждающих импульсов, что существенно увеличивает отношение «сигнал/шум».

Измерение мощности лазерного излучения производилось измерителем средней мощности и энергии импульсов ИМО-2. Контроль длины волны и спектральной ширины линии излучения осуществлялся при помощи спектрометра Spectra Star S150HR. Для исследования спектра поглощения непосредственно за криостатом устанавливался фотодиод, регистрирующий интенсивность прошедшего через образец излучения.

Описанная установка является многофункциональной. Она совмещена с персональным компьютером, и все режимы выполняются по заданной программе. Установка позволяет возбуждать и исследовать обращенное долгоживущее фотонное эхо, обращенную долгоживущую фотонную индукцию и оптическое сверхизлучение; в исследуемых образцах определять времена релаксации оптических уровней и сверхтонких подуровней основного состояния; проводить исследования ДСФЭ в зависимости от различных параметров, таких как внешние электрические и магнитные поля, поляризации возбуждающих импульсов.

3. Спектроскопическое исследование кристаллов

Съемка спектров поглощения кристаллических образцов граната и флюорита производилась при температуре жидкого гелия; одновременно с этим осуществлялись поисковые эксперименты по фотонному эху. Кристаллы форстерита и фторида натрия-иттрия исследовались при температуре жидкого азота.

Кристалл алюмоиттриевого граната $Y_3Al_5O_{12}$ обладает кубической симметрией. Ионы тулия замещают ионы иттрия в додекаэдрических положениях D_2 симметрии. Спектр пропускания в образце граната толщиной 3.5 мм при температуре жидкого гелия показан на рис. 2.

В результате исследований было выявлено сильное поглощение на длине волны 793.2 нм (то есть на интересующем нас переходе ${}^3H_6(1) \rightarrow {}^3H_4(1)$). В указанном

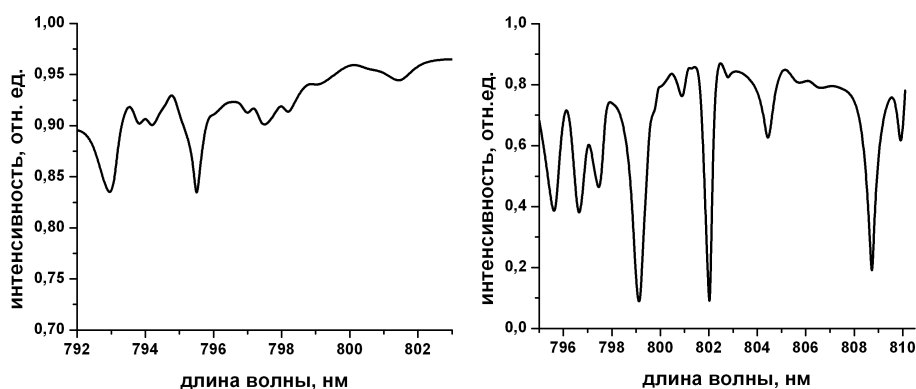


Рис. 3. Спектр пропускания в кристалле $\text{Mg}_2\text{SiO}_4:\text{Tm}^{3+}$ (слева) и в $\text{Na}_{0,4}\text{Y}_{0,6}\text{F}_{2,2}:\text{Tm}^{3+}$ (справа) при температуре жидкого азота

образце интенсивность прошедшего излучения ослаблялась практически до уровня фона, из-за чего эхо в режиме обращения не наблюдалось. Несмотря на оптическую обработку кристаллического образца до толщины 250 мкм, сигналы фотонного эха в нем не возникали по причине сильного концентрационного тушения.

Флюорит CaF_2 также принадлежит к кубической группе симметрии. Ионы Tm^{3+} замещают ионы Ca^{2+} и одновременно компенсируют отрицательный заряд иона F^- внутри ячейки. Существует две возможные альтернативы замещения: тетрагональная (C_{4v}) и тригональная (C_{3v}) позиция.

Исследовался спектр пропускания (рис. 2) образца толщиной 3 мм. Обнаружено множество близкорасположенных слабых линий поглощения, включая линии на длинах волн 795.10 нм и 799.10 нм. Эти результаты коррелируют с данными работы [5]. Была предпринята попытка регистрации фотонного эха на этих линиях, однако эхо не наблюдалось из-за наличия большого числа соседствующих переходов. Сложная спектральная структура флюорита, выявленная в наших исследованиях, находит подтверждение в работе [6], где исследовались параметры кристаллического поля и спектр кристалла флюорита в зависимости от различной симметрии центров замещения.

Кристаллы форстерита Mg_2SiO_4 , легированные различными редкоземельными ионами, широко используются в последнее время в качестве перспективных сред для лазерной генерации [7]. Форстерит имеет орторомбическую структуру. Ионы тулия Tm^{3+} гетеровалентным образом замещают ионы Mg^{2+} . Известно [8], что в структуре форстерита имеется два кристаллографически различных типа кислородных октаэдров, внутри которых находятся ионы магния. Соответственно, существует две альтернативы замещения: положение с триклинной C_i симметрией и положение с моноклинной C_s симметрией.

В исследованный кристаллический образец Mg_2SiO_4 ионы тулия входят как оксид Tm_2O_3 (1 вес.% Tm^{3+}). Спектр пропускания образца (рис. 3) при температуре жидкого азота содержит слабые линии поглощения на длине волны 795.5 нм и 793.0 нм, соответствующие переходу ${}^3\text{H}_6(1) \rightarrow {}^3\text{F}_4(1)$. Следует отметить, что полученные данные хорошо коррелируют с результатами работы [8], в которой примесные кристаллы форстерита изучались методом селективной лазерной спектроскопии.

Последним был исследован кристалл двойного фторида натрия и иттрия $\text{Na}_{0,4}\text{Y}_{0,6}\text{F}_{2,2}$ с концентрацией примесных ионов тулия около 1 вес.%. Интерес к двойным фторидам также связан с перспективой их использования в качестве ма-

Табл. 1

Спектральные параметры кристаллов, допированных ионами Tm^{3+}

Матрица	C, %	Переход	λ , нм	Γ_{ho} , нм	T_1 , мс	T_2 , мкс	Источник, метод
$Y_3Al_5O_{12}$	0.17	$^3H_6(1)-^3H_4(1)$	793.15	0.042	0.80	$75^{нэксп}$ (0 Гс) 105 (438 Гс)	[8], эхо
	10.00		793.20	0.700	-	-	КФТИ, эхо
CaF_2	0.10	$^3H_6(1)-^3H_4(1) C_{4v}$	795.63	0.019	-	-	[5], ВСП
		$^3H_6(1)-^3H_4(1) C_{3v}$	800.14	0.015	-	-	
	10.00	$^3H_6(1)-^3H_4(1) C_{4v}$	795.10	1.800	-	-	КФТИ, эхо
		$^3H_6(1)-^3H_4(1) C_{3v}$	799.10	0.900	-	-	
Mg_2SiO_4	1.00 вес.	$^3H_6(1)-^3F_4(1)$	793.65	0.320	-	-	[8],
			795.23	0.470	-	-	СЛС
			795.50	0.253	-	-	КФТИ, эхо
$Na_{0.4}Y_{0.6}F_{2.2}$	1.00 вес.		791.16 802.00 808.80	0.555 0.256 0.219			КФТИ, эхо
LaF_3	0.10	$^3H_6(1)-^3H_4(1)$	796.52	0.008	2.06	7 (0 Гс) $80^{нэксп}$ (415 Гс)	[10], эхо
Y_2SiO_7	0.10	$^3H_6(1)-^3H_4(1)$	790.43	0.208	-	23	[11]

Примечания: эхо – исследование методом фотонного эха, ВСП – выжигание спектральных провалов, СЛС – селективная лазерная спектроскопия, в круглых скобках указаны величины внешнего магнитного поля, прикладываемого к образцу

териалов квантовой электроники [9]. Кристаллы такого рода не обладают дальним порядком и по степени молекулярной упорядоченности занимают промежуточное положение между обычными и жидкими кристаллами.

Исследование спектра поглощения образца при температуре жидкого азота (рис. 3) выявило несколько сильных линий поглощения на длинах волн 797.1 нм, 802.0 нм, а также 808.8 нм.

Спектральные параметры примесных кристаллов, измеренные в наших экспериментах, а также данные других авторов представлены в табл. 1.

Заключение

Установлено, что в кристаллах с большой (~ 10 ат.%) концентрацией примесных ионов концентрационное тушение препятствует генерации сигналов фотонного эха. Большинство исследованных образцов имеет серии близкорасположенных линий в спектральной области 790–810 нм. В таких условиях сигналы фотонного эха в кристаллах не возбуждаются, поскольку энергия накачки тратится на одновременное возбуждение множества переходов. Проведенные исследования позволяют утверждать, что в качестве носителей информации для ФЭП предпочтительнее использовать кристалл граната с тулием, поскольку он обладает ярко выраженным изолированным переходом на длине волны 793.2 нм. Фотонное эхо наблюдалось в кристаллах граната с концентрацией примесных ионов тулия ~ 0.1 ат.% [5]. Следует отметить также результаты работы [12], в которой исследовалась возможность реализации лазерного охлаждения в кристаллах фторидов, активированных редкоземельными ионами (в частности, рассматривался образец $LiYF_4: Tm^{3+}$). Практическая реализация самоохлаждающихся оптических процессоров является на сегодняшний день одним из самых перспективных направлений исследований

(см., например, [13]) Интересным с точки зрения его использования в качестве носителя информации является кристалл трифторида лантана с тулием, обладающий рекордным (для представленных образцов) временем фазовой релаксации при температуре жидкого гелия. Исследования примесных кристаллов будут продолжены в ближайшем будущем.

Авторы благодарят А.М. Шегеду и В.Ф. Тарасова за предоставленные образцы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 05-02-16003а, 05-02-16169-а и 04-02-81009-Бел-2004а), Президиума РАН (программа «Квантовая макрофизика») и ОФН РАН (программа «Оптическая спектроскопия и стандарты частоты»).

Summary

K.R. Karimullin, V.A. Zuykov, D.A. Khristoforova, V.V. Samartsev. On possibility of applying crystals doped with triple-charged thulium ions in photon echo processors.

The paper reports on possibility of applying impure crystals in optical phase memory and optical coherent transient devices. Experimental arrangement of the photon echo processor is described. It is found that crystals doped with thulium ions are suitable as a media. The paper touches upon pulsed echo spectrometer used for investigation of the transmission spectra of the samples and carrying on initial experiments on long-lived stimulated photon echo. Spectral parameters of investigated impure crystals are presented.

Литература

1. *Ахмедиев Н.Н., Самарцев В.В.* Новые физические принципы оптической обработки информации. – М.: Наука, 1990. – С. 326–359.
2. *Macfarlane R.M., Shelby R.M.* Spectroscopy of Solids Containing Rare Earth Ions / Eds. A.A. Karlyanskiy and R.M. Macfarlane. – Amsterdam, 1987. – P. 51.
3. *Каримуллин К.Р., Зуйков В.А., Самарцев В.В.* Экспериментальная установка «Оптический эхо-процессор» // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия. Сб. тр. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2004. – С. 301–308.
4. *Mitsunaga M., Yano R., Uesugi N.* Time- and frequency-domain hybrid optical memory: 1.6-kbit data storage in $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ // Opt. Lett. – 1991. – V. 16. – P. 1890–1892.
5. *Macfarlane R.M.* Spectral hole burning in the trivalent thulium ion // Opt. Lett. – 1993. – V. 18. – P. 829–831.
6. *Strickland N.M., Jones G.D.* Site-selective spectroscopy of Tm^{3+} centers in $\text{CaF}_2:\text{Tm}^{3+}$ // Phys. Rev. B. – 1997. – V. 56. – P. 10916–10929.
7. *Gaister A.V., Zharikov E.V., Lebedev V.F. et al.* Pulsed and CW lasing in a new $\text{Cr}^{3+}:\text{Li}:\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ laser crystal // Quantum Electronics. – 2004. – V. 34. – P. 693–694.
8. *Гордеев Е.Ю., Наумов А.К., Семашко В.В. и др.* Выращивание кристаллов $\text{Na}_4\text{Me}_6\text{F}_{22}:\text{Ce}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ (Me = Y, Lu) – перспективных материалов квантовой электроники и их лазерно-спектроскопические свойства // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия. Сб. тр. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2006. – С. 99–102.
9. *Воробьева Е.Н., Лис Д.А., Малкин Б.З. и др.* Селективная лазерная спектроскопия кристаллов $\text{Mg}_2\text{SiO}_4:\text{R}^{3+}$ (R=Ho, Tm) // Когерентная оптика и оптическая спектроскопия. Сб. тр. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2004. – С. 397–402.

10. *Macfarlane R.M.* Photon-echo measurements on the trivalent thulium ion // *Opt. Lett.* – 1993. – V. 18. – P. 1958–1960.
11. *Wang G.M., Equall R.W., Cone R.L. et. al.* Optical dephasing mechanisms in $\text{Tm}^{3+}:\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ // *Opt. Lett.* – 1996. – V. 21. – P. 818–820.
12. *Нуртдинова Л.А., Семашко В.В., Наумов А.К. и др.* Спектроскопические предпосылки возможности реализации эффекта оптического охлаждения на фторидных кристаллах, активированных ионами Yb^{3+} и Tm^{3+} // *Когерентная оптика и оптическая спектроскопия. Сб. тр.* – Казань: Казан. гос. ун-т, 2004. – С. 309–314.
13. *Петрушкин С.В., Самарцев В.В.* О возможности создания оптически охлаждаемого твердотельного эхо-процессора // *Изв. РАН. Сер. Физическая.* – 2004. – Т. 68. – С. 1308–1310.

Поступила в редакцию
30.01.07

Каримуллин Камиль Равкатович – аспирант кафедры оптики и нанофотоники Казанского государственного университета, инженер-исследователь лаборатории нелинейной оптики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

E-mail: gamil@inbox.ru

Зуйков Владимир Александрович – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории нелинейной оптики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

E-mail: zuikov@mail.knc.ru

Христофорова Дарья Анатольевна – студентка физического факультета Казанского государственного университета.

Самарцев Виталий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией нелинейной оптики Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН.

E-mail: samartsev@kfti.knc.ru