

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 621.373.826

*Т.Н. КОПЫЛОВА**, *Г.В. МАЙЕР***, *Е.Н. ТЕЛЬМИНОВ***, *В.А. СВЕТЛИЧНЫЙ**, *К.М. ДЕГТЯРЕНКО****ДВУХЧАСТОТНЫЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ЛАЗЕР
НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ**

Разработан двухчастотный узкополосный перестраиваемый лазер на основе твердотельных органических активных сред, с накачкой 2-й гармоникой АИГ–Nd³⁺-лазера. Диапазон излучения лазера – от УФ (с удвоением частоты) до ближнего ИК-диапазона. Энергетические и ресурсные характеристики лазера достаточны для его практического применения. Он может быть использован в качестве задающего генератора мощного узкополосного твердотельного лазера на основе органических соединений.

Ключевые слова: двухчастотный лазер, твердотельные активные среды, параметрическое преобразование.

Интерес исследователей к созданию твердотельных лазеров на основе органических соединений понятен, так как на их основе возможно создание компактных, удобных в эксплуатации лазеров, которые найдут широкое применение в различных областях науки и техники (медицине, экологии, оптических системах связи, современных электронных устройствах и т.д.). Значительные успехи в их создании достигнуты в последние 10 лет [1, 2].

При накачке излучением 2-й гармоникой АИГ–Nd³⁺-лазера (532 нм) созданы твердотельные активные среды с эффективностью преобразования и ресурсом работы, не уступающие растворам [3]. В УФ- и видимом диапазоне спектра успехи менее значительны в силу использования для возбуждения УФ-излучения (гармоник АИГ–Nd³⁺-лазера, азотного, эксимерных лазеров), инициирующего процессы фотораспада как органических люминофоров, так и разрушения самих матриц [4]. Однако полученные результаты в этом направлении [5] обнадеживающие.

Большой прогресс достигнут в разработке и создании конструкций твердотельных перестраиваемых лазеров [6, 7]. Созданы осцилляторы на основе твердотельных активных сред с высоким качеством выходного излучения (узкой линией, малой расходимостью и высокой эффективностью). Использование таких осцилляторов (задающих генераторов) в каскаде усилителей позволяет получать высокую энергию качественного излучения (до 100 мДж в импульсе) [8], которую можно эффективно преобразовать в коротковолновую область (ближний УФ и видимый диапазон спектра). Такие лазеры находят применение в диагностических комплексах газовой, жидкостной среды и, в частности, в лазерных системах дистанционного зондирования атмосферы.

В связи с вышесказанным актуальна задача разработки и создания твердотельных перестраиваемых лазеров, излучающих в широком спектральном диапазоне, имеющих качественное выходное излучение, высокую эффективность излучения и ресурс работы.

Целью данного исследования была разработка и создание двухчастотного узкополосного твердотельного лазера на основе органических соединений с высокой эффективностью преобразования, излучающего в диапазоне от УФ- до ближнего ИК-диапазона спектра. В качестве источника накачки использовалась 2-я гармоника АИГ–Nd³⁺-лазера. Задачи исследования: разработка и создание высокоэффективных и фотостабильных твердотельных активных сред; разработка схемы и создание 2-частотного осциллятора (задающего генератора); параметрическое преобразование излучения в УФ-диапазон спектра.

Эксперимент

На рис. 1 приведены структурные формулы органических флуорофоров и компонент полимерных материалов, используемых для создания твердотельных активных сред. Лазерные элементы изготавливались вручную, оптического качества поверхности не достигалось. Подробно метод синтеза твердотельных активных сред описан в [3].

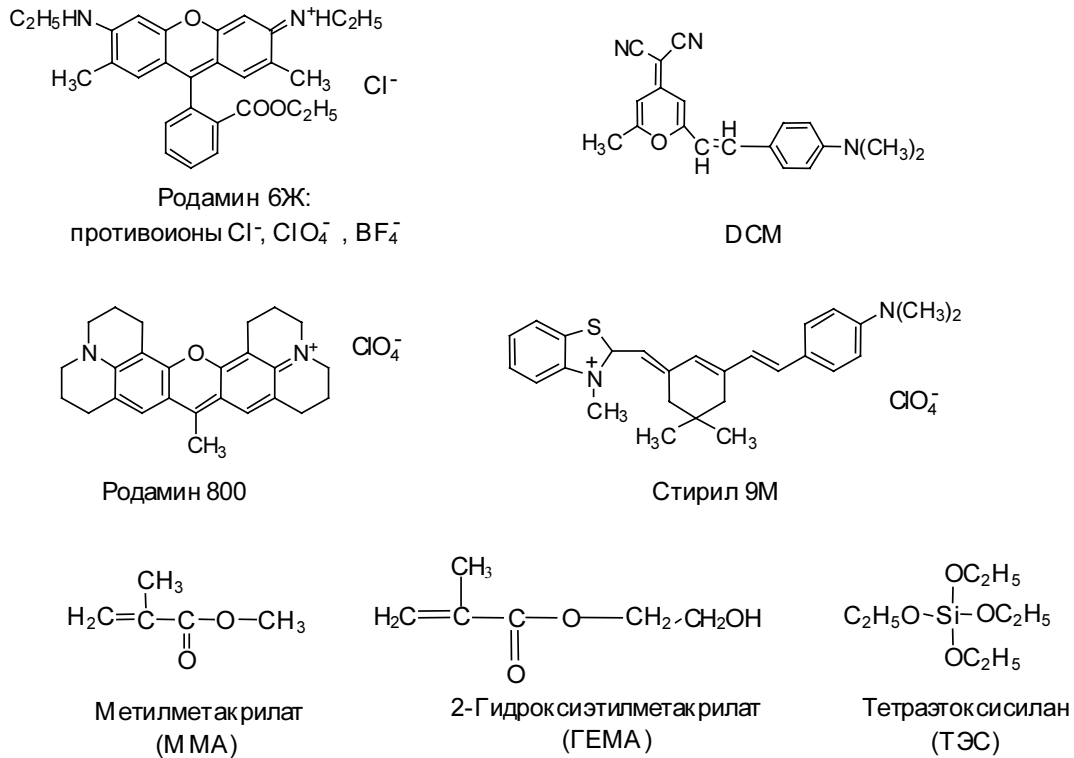


Рис. 1. Структурные формулы люминофоров и мономеров для синтеза твердотельных элементов

Лазерную активность созданных материалов исследовали в поперечном варианте накачки 2-й гармоникой АИГ– Nd^{3+} -лазера ($\lambda = 532$ нм, длительность импульса $\tau_{1/2} = 15$ нс, энергия в импульсе 30 мДж, частота повторения 1–10 Гц).

Резонатор был образован глухим зеркалом и гранью образца, база резонатора составляла 1,5–2 см, плотность мощности накачки – 10 МВт/см². Спектральные характеристики генерации регистрировались с помощью спектрометра «Real», позволяющего регистрировать спектр за один возбуждающий импульс; энергетические – с помощью калориметрических измерителей ИМО-2Н, КТП-2, а также пирозлектрического измерителя Gentec ED TD-100A-UV; временные – осциллографом Textronix DS 224 100 МГц и скоростными PIN-фотодиодами Thorlabs DET 210.

Обсуждение полученных результатов

Лучевая стойкость созданных материалов исследовалась на установке, блок-схема которой приведена на рис. 2. В табл. 1 приведены пороговые значения энергии (E) и мощности (W) излучения, при которых не наблюдалось микроразрушений матриц после воздействия 100 импульсов возбуждающего излучения (E_{100} , W_{100}), а также плотности энергии и мощности, при которых наблюдалось разрушение матриц после воздействия одного импульса возбуждающего излучения (E_1 , W_1). Видно, что лучевая стойкость синтезированного ПММА составляет 13,5 Дж/см². Эта ве-

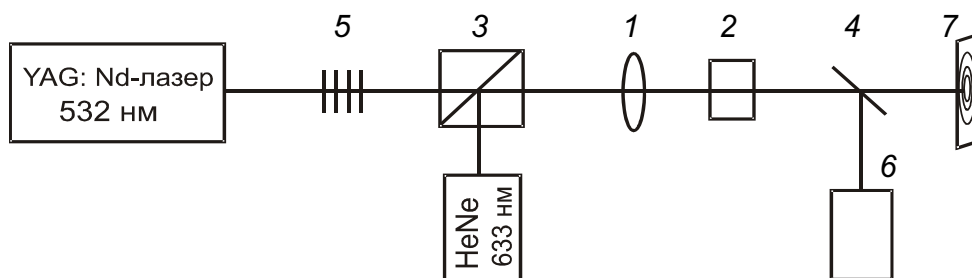


Рис. 2. Блок-схема установки для исследования оптической прочности полимеров: 1 – линза; 2 – полимерный образец; 3 – светоделительный кварцевый куб; 4 – светоделительная кварцевая пластина; 5 – калиброванные светофильтры; 6 – фотоприемник; 7 – экран

личина сравнима с известной лучевой стойкостью матриц на основе лучших образцов ПММА [4]. Модификация матриц приводит к значительному улучшению лучевой стойкости (до 22,5 Дж/см²).

Таблица 1

Пороговые значения энергии (E) и плотности мощности энергии (W) полимерных матриц разного состава при воздействии излучением 2-й гармоникой АИГ–Nd-лазера (532 нм)

Матрица	E_1 , Дж/см ²	E_{100} , Дж/см ²	W_1 , МВт/см ²	W_{100} , МВт/см ²
ПММА	13,5	0,75	900	50
ПГЕМА	22,5	6	1500	400
П(ММА:ГЕМА, 1:1)	18	3	1200	200
П(ММА:ГЕМА, 1:1 + ТЭС 15 %)	19,5	4,5	1300	300

Примечание. Индекс «1» соответствует энергии (плотности мощности энергии) одного импульса, при которой возникают микроразрушения в полимерной матрице; «100» – энергии одного импульса (плотности мощности энергии), при которой не наблюдалось микроразрушений после 100 импульсов воздействия.

В табл. 2 приведены генерационные характеристики твердотельных активных сред на их основе.

Таблица 2

Генерационные характеристики активных сред твердотельного перестраиваемого лазера на основе органических соединений с накачкой $\lambda = 532$ нм

Соединение	Матрица, растворитель	λ_r , нм	КПД, %	$P_{0,5}$, имп.
Р6Ж(СГ)	Этанол	575	52	
	П(ММА:ГЕМА,1:1)	579*	44	92
	П(ММА:ГЕМА,1:1)+ТЭС (15 %)	580*	36, 41*	47, >100*
	Аэрогель	587	21*	>100*
Р6Ж(СlO ₄ ⁻)	Этанол	575	61	
	П(ММА:ГЕМА,1:1)	588*	50, 50*	>100, >100*
	П(ММА:ГЕМА,1:1+ТЭС 15 %)	580*	46, 41*	50, >100*
Р6Ж(ВF ₄ ⁻)	Этанол	575	52	
	П(ММА:ГЕМА,1:1)	582–586	42, 42*	53, 90*
	П(ММА:ГЕМА,1:1+ТЭС 15 %)	592–587	50, 42*	46, >100*
ДСМ	Этанол	635	40	
	Этилацетат	607	32	
	ПММА	603	24, 21*	3,2, 10*
	П(ММА:ГЕМА,85:15)	605	33, 33*	10, 42*
	П(ММА:ГЕМА, 1:1)	608	25, 26*	18, 65*
	П(ММА:ГЕМА, 1:1)*	610	22, 32*	50, >100
	П(ММА:ГЕМА,1:1+ТЭС 15 %)	615	33, 30*	16, 139*
	П(ММА:ГЕМА,1:1+ТЭС 10 %), рН = 6	615	36, 30*	9, 20*
	П(ММА:ГЕМА,1:1+ТЭС 10 %), рН = 2	618	10, 8*	2,5, 5*
Оксазин 1	П(ММА:ГЕМА, 9:1)*	739	33	1,2
	П(ММА:ГЕМА, 1:1+ТЭС 15 %)	731	14	0,6
	П(ММА:ГЕМА,1:1+ТЭС 15 %)*	730	30	0,75
Р800	Этанол**	788	7	
	П(ММА:ГЕМА,9:1)**	787	17	
	П(ММА:ГЕМА,1:1)**	791	20, 9,5*	22*
Стирил 9М	Этанол	812	15	
	П(ММА:МП, 95:5)	820	15, 15*	25, >100*

Примечание. Концентрация красителя $C = 10^{-3}$ М, * – $C = 2 \cdot 10^3$ М; ** – $C = 5 \cdot 10^3$ М; W – плотность мощности накачки – 30 МВт/см², * – 9 МВт/см², λ_r – длина волны генерации; $P_{0,5}$ – ресурс работы активной среды: количество импульсов накачки, при котором КПД генерации падает вдвое, МП – метилпирролидон.

Видно, что диапазон излучения созданных твердотельных активных сред – 575÷820 нм. Их эффективность преобразования и ресурс работы определяются оптимальной композицией: лазерный краситель + матрица. Нет универсальной матрицы для создания высокоэффективных и фотостабильных активных сред перестраиваемых лазеров. Для каждого красителя оптимальной может быть только определенная композиция. Это связано с особенностями излучения органической молекулы в той или иной среде, влияющих на нее межмолекулярных взаимодействий и т.д. Так, твердотельные активные среды на основе родамина 6Ж(CI⁻) генерируют с высокой эффективностью и фотостабильностью в гибридных материалах (ПММА:НЭМА 1:1)+ТЭС (15 %), в то время как для родамина 6Ж(CI⁻) перспективны и композиции с модифицированным органическим полимером (ПММА:ГЕМА 1:1). Создание оптимального соотношения эластичных и жестких мономеров в полимерном материале приводит к улучшению генерационных характеристик активной среды. Свободные объемы между полимерными цепями обеспечивают эффект «клетки» для молекулы мономера, препятствуя его распаду.

Все вышесказанное подтверждается результатами по созданию твердотельных активных сред на основе замещенного пирана (ДСМ). ДСМ в ПММА имеет довольно низкий ресурс работы (10^3 импульсов). При модификации ПММА ресурс работы активной среды возрастает: для ДСМ ($c = 10^{-3}$ М) в П(ММА:ГЕМА 1:1) он равен 65×10^3 импульсов, в гибридном материале П(ММА:ГЕМА 1:1)+ТЭС (15 %) ресурс составляет 139×10^3 импульсов.

Несомненный интерес представляет возможность создания твердотельной активной среды лазера на основе аэрогеля (пористого стекла). Аэрогель пропитывался раствором молекулярной композиции, и синтез органического полимера осуществлялся в его порах. Ресурс работы активной среды на основе родамина 6Ж(CI⁻) в аэрогеле высок – много более 10^5 импульсов, однако эффективность преобразования достигает 21 %, что может быть связано с худшей оптической прозрачностью материала из-за трудностей равномерного заполнения пор и возможного рассеяния излучения, так как среда является гетерогенной. Возможно, что полимеризация в объеме микропор существенно отличается от блочной полимеризации: в микропорах затруднен доступ мономера к области реакции, мономер в процессе полимеризации дает сильную усадку, что может приводить к отслаиванию полимера от поверхности пор.

На основе твердотельных активных сред создан двухчастотный узкополосный лазер с параметрическим преобразованием частоты. Схема лазера представлена на рис. 3. Излучение лазера накачки фокусируется цилиндрической линзой и попадает на твердотельный лазерный элемент, представляющий собой усеченный по боковой грани цилиндр (рис. 3, б). Плотность мощности возбуждающего излучения составляет 35 МВт/см^2 . Резонатор лазера образован дифракционной

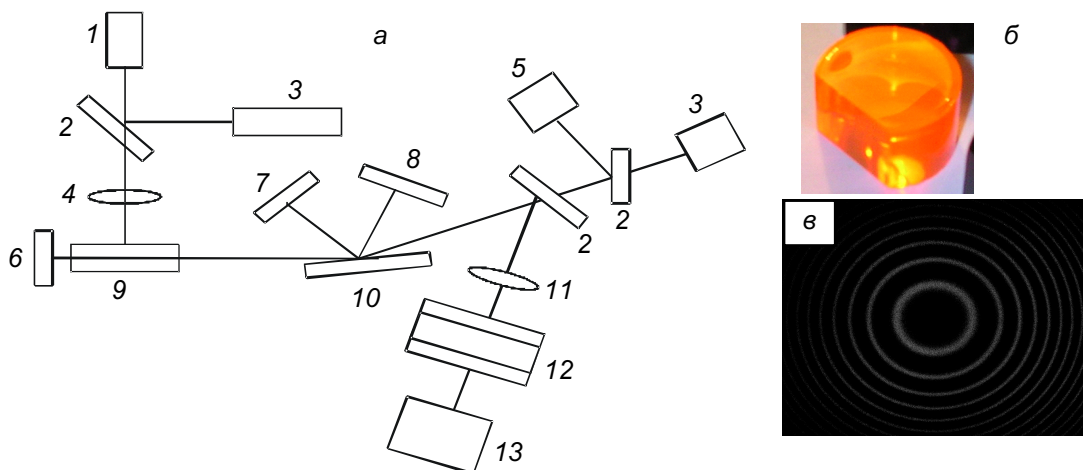


Рис. 3. Двухчастотный твердотельный лазер на основе органических соединений: а) блок-схема лазера и системы регистрации: 1 – АИГ–Nd (532 нм)-лазер; 2 – светоделительные пластинки; 3 – измерители энергии импульса; 4 – фокусирующая цилиндрическая линза; 5 – фотоприемник; 6 – глухое зеркало $R = 98 \%$; 7 – глухое зеркало обратной связи на λ_1 ; 8 – глухое зеркало обратной связи на λ_2 ; 9 – активный элемент; 10 – дифракционная решетка 1200 штр./мм; 11 – отрицательная линза; 12 – интерферометр Фабри – Перо с базой 0,6 мм; 13 – фоторегистрация интерференционной картины; б) активный элемент на основе родамина 6Ж(BF₄⁻) в П(ММА:ГЕМА, 1:1); в) интерферограмма выходного излучения лазера

решеткой (1200 штр./мм), работающей в режиме скользящего падения (угол падения 87°), и зеркалами (7, 8), обеспечивающими обратную связь для полос генерации на λ_1 и λ_2 . В качестве глухого зеркала используется алюминиевое зеркало с коэффициентом отражения порядка 98 %.

Юстировка резонатора для получения двухполосной генерации осуществляется следующим образом: по лучу однопроходной генерации от глухого зеркала 6 и дифракционной решетки 10 производится юстировка излучения от первого и второго порядков дифракции в плоскость зеркал 8 и 7 соответственно. Далее производится юстировка до получения генерации на λ_1 , λ_2 каждым из зеркал.

Перестройка каждой из полос генерации на λ_1 и λ_2 осуществляется путем изменения угла поворота зеркал 7 и 8. В процессе независимой перестройки линий генерации может возникнуть ситуация, когда они начнут перекрываться. В этом случае происходит захват одной линией соседней, как только они разойдутся, генерация становится двухполосной. На рис. 3, в приведена интерферограмма выходного излучения, полученная с помощью интерферометра ИТ 28-30 с базой 0,6 мм, что позволило оценить ширину линии генерации $\leq 0,04$ нм, при этом эффективность преобразования излучения составляет 5 %.

Спектр излучения двухчастотного твердотельного лазера за один импульс элемента РБЖ (BF4), $C = 5 \cdot 10^{-4}$ в П(ММА+ГЕМА, 1:1), зарегистрированный с помощью спектрометра, представлен на рис. 4. Максимум широкополосной генерации лежит на $\lambda = 575$ нм. Перестройка каждой из полос генерации может осуществляться независимо в пределах до 25 нм.

Ресурс работы активной среды в неселективном резонаторе при плотности мощности накачки порядка 35 МВт/см^2 составляет $80 \cdot 10^3$ импульсов. При плотности мощности 10 МВт/см^2 после $100 \cdot 10^3$ деградация активной среды не наблюдается, что говорит о возможности использования этой среды для создания твердотельного лазера с высоким ресурсом работы.

Выходное излучение 2-частотного лазера преобразовано с помощью нелинейного кристалла ВВО в УФ-диапазон спектра. Это позволило получить излучение в диапазоне 290–410 нм с высоким ресурсом работы, что значительно расширяет возможности практического использования созданного лазера.

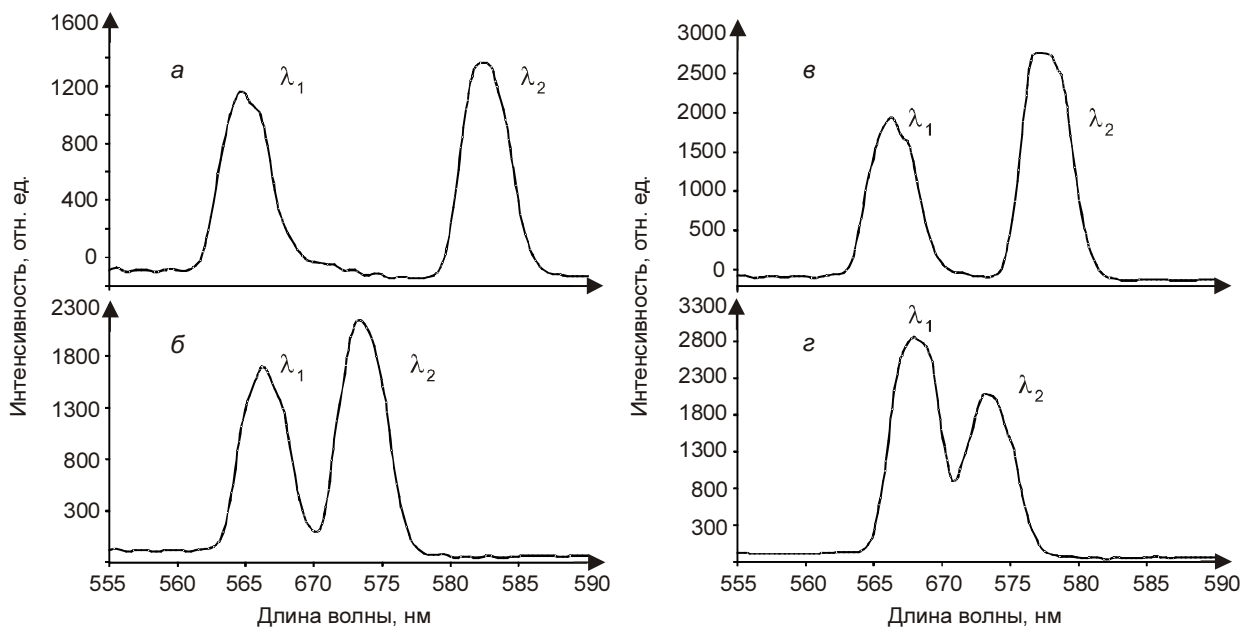


Рис. 4. Спектры двухполосной генерации на λ_1 и λ_2 : а – линии λ_1 и λ_2 разведены максимально; б – λ_1 и λ_2 приближены друг к другу на 3 и 10 нм соответственно; в – λ_1 стоит на месте, а λ_2 сдвинута на 5 нм в красную область; г – λ_1 и λ_2 приближены друг к другу на 1,5 и 5 нм соответственно

Заключение

Таким образом в результате проведенного исследования создан твердотельный 2-частотный лазер на основе органических соединений с параметрическим преобразованием частоты, излучающий в диапазоне 290–820 нм. Параметры его выходного излучения (ширина линии – 0,04 нм, эффективность преобразования – больше 5 %, ресурс работы – больше 10^5 импульсов) позволяют

построить на его основе (как задающего генератора) мощный узкополосный лазер для диагностического комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еремина Н.С., Самсонова Л.Г., Копылова Т.Н. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2008. – № 5. – С. 89–95.
2. Никонов С.Ю., Артюхов В.Я., Копылова Т.Н. и др. // Там же. – 2009. – № 3. – С. 51–60.
3. Costela A., Garcia-Moreno J., and Sastre R.. // Phys. Chem. Phys. – 2003. – V. 5. – P. 4745–4763.
4. Kopylova T.N. et al. // Appl. Phys. B. – 2001. – V. 73. – No. 7. – P. 25–29.
5. Копылова Т.Н. и др. // Квантовая электроника. – 2003. – Т. 33. – № 1. – С. 498–502.
6. Duarte F. J. // Proceeding of the international conference on Lasers'94. – McLean, VA: STS Press, 1995. – P. 140–142.
7. Mandl A., Lavriev A., and Klimex D.E. // Ibid. – 1996. – P. 362–365.
8. Allik T.H., Chandra S., Fox J., and Swim C. // Ibid. – 1996. – P. 391–396.

*Сибирский физико-технический институт
им. В.Д. Кузнецова Томского государственного университета, г. Томск, Россия
**Томский государственный университет, г. Томск, Россия
E-mail: kopylova@phys.tsu.ru

Поступила в редакцию 02.07.08.

Копылова Татьяна Николаевна, д.ф.-м.н., профессор, зав. лаб. лазерной физики СФТИ ТГУ;
Майер Георгий Владимирович, д.ф.-м.н., профессор, ректор ТГУ;
Тельминов Евгений Николаевич, к.ф.-м.н., доцент ТГУ;
Светличный Валерий Анатольевич, к.ф.-м.н., доцент, ст. науч. сотр. СФТИ ТГУ;
Дегтяренко Константин Михайлович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр. СФТИ ТГУ.