

УДК 535.374

## ДВУХЧАСТОТНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ В Nd:YLF-ЛАЗЕРЕ С ЛИНЗОПОДОБНЫМ АКТИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ И ПРОДОЛЬНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

В. В. Безотосный, М. В. Горбунков, П. В. Кострюков, М. С. Кривонос,  
Ю. М. Попов, В. Г. Тункин, Е. А. Чешев

*В лазере с линзоподобным Nd:YLF [100] активным элементом исследована зависимость поляризации и частоты излучения от длины резонатора в условиях продольной диодной накачки. Определены условия, при которых двулучепреломление в Nd:YLF активном элементе позволяет осуществлять двухчастотную генерацию.*

**Ключевые слова:** твердотельные лазеры, продольная диодная накачка, двухчастотная генерация, источники терагерцового излучения.

В настоящее время все большее внимание уделяется источникам терагерцового (ТГц) излучения. Спектральный и временной анализ ТГц импульсов, прошедших через объект, позволяет получить информацию о свойствах веществ и о протекающих в них процессах [1, 2]. Терагерцовое излучение находит также применение в решении проблем обеспечения безопасности и создании новых промышленных технологий [1].

Хорошо известны методы получения ТГц излучения, использующие фемтосекундные импульсы [1, 3, 4]. Другой перспективный метод генерации основан на использовании двухчастотных лазеров. Такие, в том числе и непрерывные, лазеры должны генерировать излучение с перестраиваемой разностной частотой, которое преобразуется в ТГц излучение с помощью оптоэлектронных эмиттеров или нелинейных кристаллов [3, 5]. Различные схемы двухчастотных лазеров с диодной накачкой, использующих в качестве активных элементов (АЭ) ряд ванадатов (Nd:YVO<sub>4</sub>, Nd:GdVO<sub>4</sub>, Nd:Gd<sub>1-x</sub>Y<sub>x</sub>VO<sub>4</sub>), рассмотрены в [6]. Использовались кристаллы, вырезанные вдоль оси *c*. Компактный источник ТГц излучения создан на основе Nd:YLF-лазера с акустооптической модуляцией добротности [7]. Генерация на длинах волн 1.047 и 1.053 мкм осуществлялась за счёт подбора потерь двух резонаторов (для двух взаимно-перпендикулярных

---

Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Ленинский пр-т, 53.

поляризацій). Оба резонатора имели общий АЭ. Представляют интерес альтернативные методы получения устойчивой двухчастотной генерации при использовании одного резонатора. Для этой цели может быть использован эффект возникновения двухчастотной генерации, наблюдавшийся в Nd:YLF-лазере при неоднородной продольной диодной накачке [8].

Продольная диодная накачка твердотельных лазеров позволяет получать лазерные пучки, близкие к гауссовой моде, при высокой эффективности генерации. Для этой цели накачка должна быть неоднородной, т.е. размеры пучка накачки должны быть меньше, чем диаметр гауссовой моды [9]. В этом случае структура лазерного пучка зависит от длины резонатора  $L$  и может существенно отличаться от гауссовой моды при некоторых значениях  $L$ , соответствующих “критическим” конфигурациям резонатора, определяемых соотношением:

$$\arccos(g_1 g_2)^{1/2} = \pi r/s, \quad (1)$$

где  $r/s$  – правильная дробь, характеризующая вырождение,  $g_{1,2} = 1 - L/R_{1,2}$  – параметры устойчивости резонатора,  $R_{1,2}$  – радиусы кривизны зеркал резонатора. Вблизи таких конфигураций обнаружено снижение порога генерации [10]. В то же время в промежутках между значениями  $L$ , соответствующими “критическим” конфигурациям, лазерное излучение близко по структуре к гауссовой моде. Такое поведение было продемонстрировано как для CW лазеров [11, 12], так и лазера с модуляцией добротности [13].

*Эксперимент.* В настоящей работе предложен способ и определены условия, при которых за счет двулучепреломления в линзоподобном АЭ Nd:YLF, вырезанном вдоль оси [100], при неоднородной продольной диодной накачке обеспечивается двухчастотный непрерывный режим генерации на длинах волн 1.047 и 1.053 мкм.

Возможность получения одновременной генерации на двух длинах волн при изменении длины резонатора Nd:YLF-лазера с линзоподобным АЭ определяется ростом (падением) эффективного усиления, наблюдающегося вблизи области разнесенных критических конфигураций в условиях пространственно неоднородной продольной накачки.

Экспериментальные исследования были выполнены с резонатором, схема которого приведена на рис. 1. Резонатор лазера образован двумя плоскими зеркалами М1 и М2. Зеркало М1 нанесено на плоский торец АЭ, является глухим для длин волн генерации 1.047 мкм/1.053 мкм и просветлено на длине волны накачки 805 нм. Другая поверхность АЭ сферическая ( $R = 60$  мм) и просветлена для длин волн генерации. Длина АЭ 6 мм. Из-за двулучепреломления в кристалле Nd:YLF АЭ представлял собой бифокальную

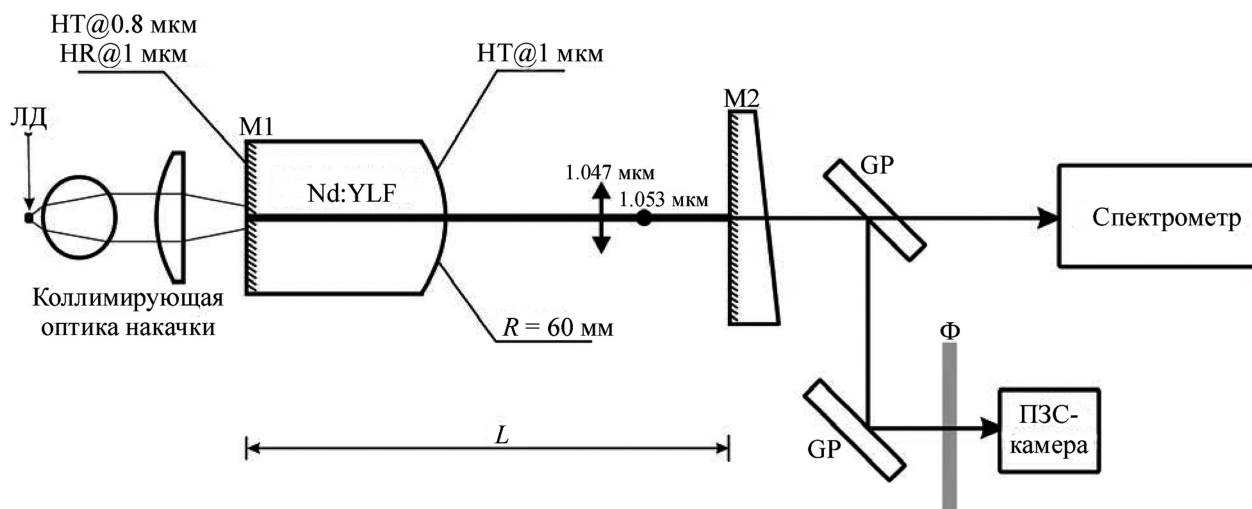


Рис. 1: Схема двухчастотного Nd:YLF-лазера с линзоподобным активным элементом HT@08 мкм, HT@1 мкм – покрытие с высоким пропусканием для  $\lambda = 0.8$  и 1 мкм соответственно, HR@1 мкм – с высоким отражением для  $\lambda = 1$  мкм, остальные пояснения в тексте.

линзу, фокусное расстояние которой различно для обыкновенной и необыкновенной волн. В условиях неоднородной продольной накачки использование такого АЭ привело к расщеплению критических конфигураций для излучений на длинах волн 1.047 и 1.053 мкм с взаимно ортогональными поляризациями. Диаметр гауссовой моды на зеркале M1 составлял около 400 мкм. Зеркало M2 имело коэффициент отражения 92%.

В качестве источника излучения накачки использовался одиночный лазерный диод (ЛД) с рабочей длиной волны излучения  $\lambda = 805$  нм и с шириной полоскового контакта  $2 \times 150$  мкм. Для согласования линии излучения ЛД с полосой поглощения иона-активатора АЭ источник накачки был термостатирован. Во всех экспериментах поляризация излучения ЛД совпадала с кристаллографической осью АЭ.

Расходимость излучения ЛД составляла  $30^\circ$  по оси, перпендикулярной плоскости гетероперехода – “быстрая” ось, и  $8^\circ$  по оси, параллельной плоскости гетероперехода – “медленная” ось. Коллимация излучения ЛД вдоль “быстрой” оси осуществлялась цилиндрической линзой, затем сферической линзой осуществлялось формирование пучка накачки в АЭ. Оптическая схема накачки лазера показана на рис. 2(а). Использовались цилиндрическая линза (ЦЛ) с фокусным расстоянием  $F = 0.285$  мм и сферическая (СЛ) с фокусным расстоянием  $F_c = 4.24$  мм.

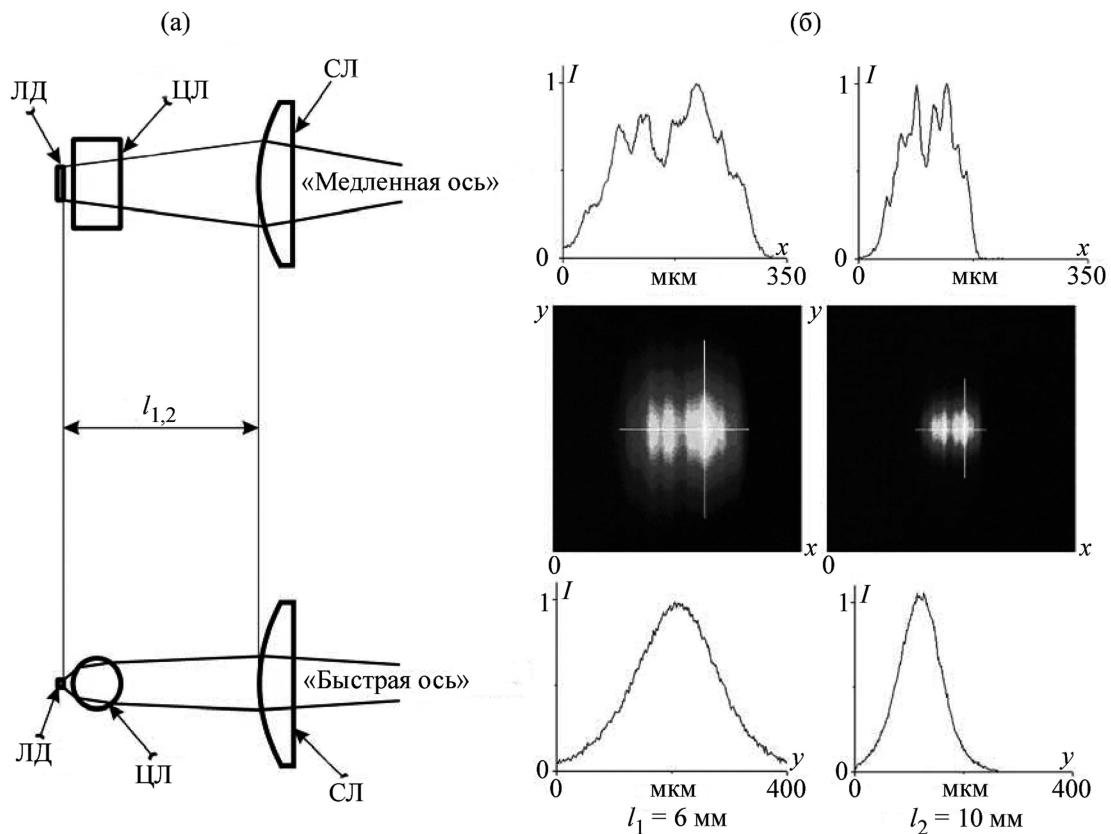


Рис. 2: Оптическая схема накачки вдоль «быстрой» и «медленной» осей (а) и соответственно пространственные распределения излучения накачки в активном элементе (б). ЛД – лазерный диод, ЦЛ – цилиндрическая линза, СЛ – сферическая линза.

Схема накачки позволяла изменять рабочие отрезки ЛД-СЛ ( $l_{1,2}$ , рис. 2) и следовательно изменять размеры пучка накачки в АЭ. В экспериментах использовалось два варианта рабочих отрезков ЛД-СЛ:  $l_1 = 6$  мм («мягкая» фокусировка) и  $l_2 = 10$  мм («жесткая» фокусировка). Пространственные распределения излучения накачки в активном элементе в этих случаях приведены на рис. 2(б).

Размер накачки в АЭ при «жёсткой» фокусировке  $120 \text{ мкм} \times 100 \text{ мкм}$  по уровню 0.5, степень неоднородности накачки (отношение диаметра нулевой моды к диаметру накачки) составляет  $3.3 \times 4$ . При «мягкой» фокусировке размер накачки  $250 \text{ мкм} \times 200 \text{ мкм}$  и степень неоднородности составляет  $1.6 \times 2$ , что уже близко к предельному значению 1.26, когда еще проявляются «критические» конфигурации [14].

Зеркало M2 было установлено на платформу фирмы Standa с шаговым двигателем, что позволяло перемещать его с высокой точностью параллельно себе в пределах обла-

сти устойчивости резонатора без разбюстировок. Распределения интенсивности выходного излучения регистрировались CCD-камерой THORLABS BC106-VIS, установленной на расстоянии 30 см от выходного зеркала. Ослабление интенсивности излучения, падающего на ПЗС матрицу CCD-камеры, осуществлялось при двукратном отражении на поверхностях образцовых плоскопараллельных пластин GP из стекла К8. Перед CCD-камерой были установлены светофильтры  $\Phi$  для подавления излучения накачки и видимого излучения (рис. 1). Измерение мощности лазерного излучения осуществлялось измерителем мощности FieldMaster с измерительной головкой LM-10.

В эксперименте определялась зависимость пороговой мощности накачки от длины резонатора. Измерения проводились в областях вырождений, соответствующих “критическим” конфигурациям резонатора, определяемых значениями дроби  $r/s = 1/4, 1/3, 3/8, 2/5$ .

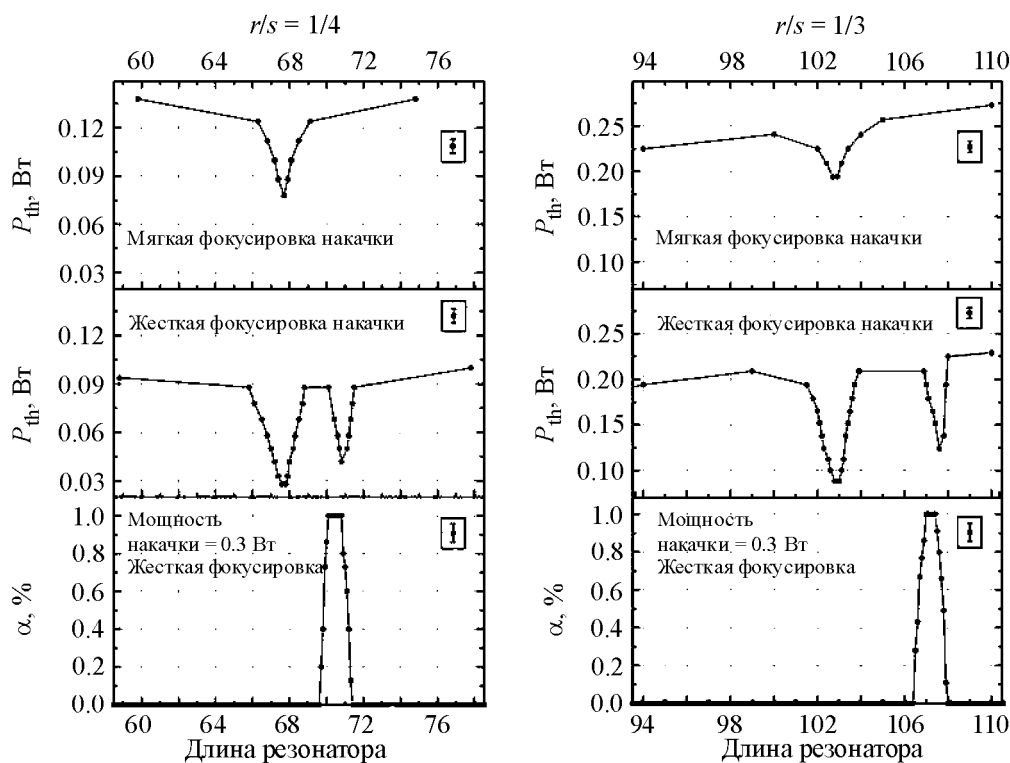


Рис. 3: Порог  $P_{th}$  мощности накачки  $Nd:YLF$ -лазера в областях “критической” конфигурации резонатора для  $r/s = 1/4, 1/3$  в условиях “мягкой” и “жесткой” фокусировки излучения накачки, а также доля  $\alpha$  излучения на длине волны 1.053 мкм в выходной генерации лазера.

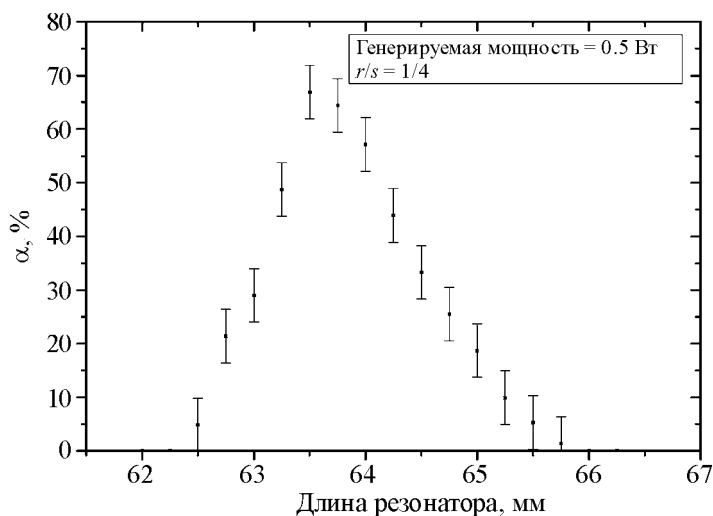


Рис. 4: Доля  $\alpha$  мощности излучения на длине волны  $\lambda = 1.053$  мкм вблизи полуконфокальной конфигурации при мощности накачки 2 Вт.

В условиях “жесткой” фокусировки наблюдались минимумы порога генерации вблизи “критических” конфигураций резонатора соответственно для длин волн 1.047 и 1.053 мкм. При мягкой фокусировке излучение с длиной волны 1.053 мкм не наблюдается, минимум порога накачки при длине волны генерации 1.047 мкм становится менее глубоким.

На рис. 3 приведены зависимости пороговой мощности накачки от длины резонатора Nd:YLF-лазера в областях “критических” конфигураций для  $r/s = 1/4, 1/3$  в условиях “мягкой” и “жесткой” фокусировки излучения накачки, а также доля мощности излучения с длиной волны 1.053 мкм в выходной генерации лазера.

Полученные экспериментально значения длин резонатора ( $L_{exp}$ ), при которых наблюдалось снижение порога генерации, приведены в табл. 1. Расчет длин резонатора, соответствующих  $r/s = 1/4; 1/3; 3/8; 2/5$  осуществлялся на основе соотношения (1) и выражения для параметров устойчивости  $g_1g_2$  использовавшегося резонатора:

$$g_1g_2 = \left[ 1 + (L - l_{AE}) \left( -\frac{n_{AE} - 1}{R_{AE}} \right) \right] \cdot \left[ 1 - \frac{l_{AE}(n_{AE} - 1)}{R_{AE}n_{AE}} \right], \quad (2)$$

где  $l_{AE}$  – длина АЭ,  $L$  – длина резонатора,  $n_{AE}$  – показатель преломления АЭ ( $n_{AE}(1.047 \text{ мкм}) = 1.470$ ,  $n_{AE}(1.053 \text{ мкм}) = 1.448$ ),  $R_{AE}$  – радиус кривизны грани АЭ.

Рассчитанные значения длин резонатора  $L_{cal}(1.047/L_{cal}(1.053))$  и соответствующего расщепления длин  $\Delta L = L(1.053) - L(1.047)$  также приведены в табл. 1. Необходимо

отметить, что расщепление  $\Delta L_L$ , обусловленное двулучепреломлением АЭ, составляет 0.13 мм для длин волн 1.047 и 1.053 мкм. Наибольший вклад порядка нескольких миллиметров в суммарное расщепление  $\Delta L$  вносит различие фокусного расстояния из-за сферической поверхности двулучепреломляющего АЭ –  $\Delta L_R$ . Видно, что экспериментальные значения находятся в хорошем соответствии с расчётными.

Т а б л и ц а 1

r/s	$g_{192}$	$L_{\text{cal}}(1.047)$ , мм	$L_{\text{exp}}(1.047)$ , мм	$\Delta L =$ $= \Delta L_L + \Delta L_R$ , мм	$\Delta L_{\text{exp}}$ , мм	Ширина области L, существ. генерации 1053 нм, мм
		$L_{\text{cal}}(1.053)$ , мм	$L_{\text{exp}}(1.053)$ , мм			
1/4	0.5	67,7	$67.8 \pm 0.2$	3.1	$3.2 \pm 0.2$	2.8
		70.8	$70.8 \pm 0.2$			
1/3	0.25	100.7	$100.7 \pm 0.2$	4.7	$4.8 \pm 0.2$	1.8
		105.4	$105.3 \pm 0.2$			
3/8	0.146	114.3	$114.2 \pm 0.2$	5.4	$4.6 \pm 0.2$	0.9
		119.7	$119.7 \pm 0.2$			
2/5	0.095	121.1	$121.0 \pm 0.2$	5.6	$4.8 \pm 0.2$	0.5
		126.7	$126.6 \pm 0.2$			

В отличие от работ [6, 7], в которых авторам удалось получить двухчастотную генерацию с использованием различных схем внутррезонаторной селекции, в настоящей работе получена устойчивая двухчастотная генерация одновременно на 1.047 и 1.053 мкм при использовании неоднородной продольной накачки путем выбора нужной длины резонатора. Зависимость доли мощности излучения на длине волны 1.053 мкм от длины резонатора вблизи полуконфокальной конфигурации ( $r/s = 1/4$ ) приведена на рис. 4.

На рис. 5 приведены пространственные распределения в лазерных пучках с ортогональными поляризациями с длинами волн 1.047 и 1.053 мкм при длине резонатора 64.3 мм, соответствующей приблизительно равному соотношению их мощностей в выходном излучении лазера.

Таким образом, в работе получена устойчивая двухчастотная генерация с длинами волн 1.047 и 1.053 мкм в резонаторе с линзоподобным Nd:YLF активным элементом при

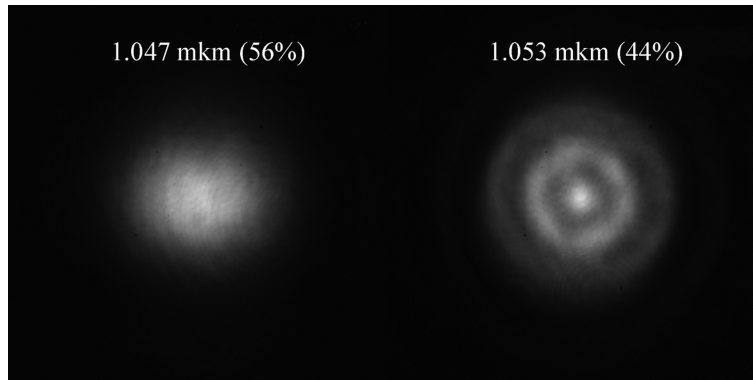


Рис. 5: Пространственные распределения излучения лазера на длинах волн 1.047 и 1.053 мкм. В скобках указана доля мощности излучения данной длины волны.

существенно неоднородной продольной диодной накачке. Управление длиной волны генерации осуществлялось путем изменения длины вблизи “критических” конфигураций резонатора.

Такой источник представляется перспективным для использования в компактных эффективных генераторах излучения 1.63 ТГц в схемах генерации разностной частоты. Представляется интересным и непосредственное использование особенности его излучения (две длины волны 1.047 и 1.053 мкм с ортогональными поляризациями) в медико-биологических экспериментах по изучению влияния на биосистемы наведенной поляризации, вращающейся с терагерцовой частотой обращения.

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №№ 09-02-01190-а, 09-02-00638-а), 11-02-12102-офи-м-2011 Программы фундаментальных исследований отделения физики РАН “Фундаментальные проблемы фотоники и физики новых оптических материалов”, Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 21, Учебно-научного комплекса ФИАН.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] X-C Zhang, Xu J, *Introduction to THz Wave Photonics* (New York, Springer, 2009).
- [2] С. В. Гарнов, И. А. Щербаков, УФН **181**(1), 97 (2011).
- [3] Y-S. Lee, *Principles of Terahertz Science and Technology* (New York, Springer, 2009).
- [4] М. М. Назаров, А. А. Ангелуц, Д. А. Сапожников, А. П. Шкуринов, Известия вузов. Радиофизика **52**(8), 595 (2009).



- [5] Г. Х. Китаева, А. Н. Пенин, А. Н. Тучак, *Оптика и спектроскопия* **107**, 553 (2009).
- [6] А. А. Сироткин, С. В. Гарнов, А. И. Загуменный и др., *Квантовая электроника* **39**, 802 (2009).
- [7] P. Zhao, S. Ragam, Y. J. Ding, I. V. Zotova, *Optics Letters* **35**, 3970 (2010).
- [8] В. В. Безотосный, М. С. Кривонос, Ю. М. Попов и др., *Известия высших учебных заведений. Физика* **54**(2), 73 (2011).
- [9] P. Laporta and M. Brussard, *IEEE J. Quantum Electron.* **27**, 2319 (1991).
- [10] Hsiao-Hua Wu, Chich-Chang Sheu, Ting-Wei Chen, et al., *Optics Communications* **165**, 225 (1999).
- [11] G. Martel, C. Labbe, F. Sanches, et al., *Opt. Commun.* **201**, 117 (2002).
- [12] V. V. Bezotosnyi, E. A. Cheshev, M. V. Gorbunkov, et al., *Appl. Opt.* **47**, 3651 (2008).
- [13] V. Besotosnii, E. Cheshev, M. Gorbunkov, et al., *Appl. Phys. B* **101**, 71(2010).
- [14] М. В. Горбунков, П. В. Кострюков, В. Г. Тункин, *Квантовая электроника* **38**(7), (2008).

Поступила в редакцию 31 марта 2011 г.