

# Перестраиваемая квазинепрерывная двухмикронная лазерная генерация с диодной накачкой на кристаллах смешанных натрий-лантан-гадолиниевых молибдатов и вольфраматов, активированных ионами $Tm^{3+}$

Ф.А.Большиков, Е.В.Жариков, Д.А.Лис, Н.Г.Захаров,  
П.А.Рябочкина, К.А.Субботин, О.Л.Антипов

*В условиях лазерной диодной накачки впервые получена двухмикронная лазерная генерация на переходе  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$  ионов  $Tm^{3+}$  в кристаллах смешанных натрий-лантан-гадолиниевых вольфраматов  $Tm:NaLa_{1/2}Gd_{1/2}(WO_4)_2$  ( $C_{Tm} = 3.6$  ат. %) (NLGW-3.6Tm) и молибдата  $Tm:NaLa_{1/3}Gd_{2/3}(MoO_4)_2$  ( $C_{Tm} = 4.8$  ат. %) (NLGM-4.8Tm). Выходная мощность лазерного излучения в квазинепрерывном режиме составила более 200 мВт, дифференциальная эффективность генерации (по поглощенной мощности накачки) на кристалле NLGW-3.6Tm для  $\pi$ - и  $\sigma$ -поляризации на длинах волн 1908 и 1918 нм была равна 34% и 30% соответственно. На данном кристалле реализована также плавная перестройка длины волны лазерной генерации в спектральном диапазоне 1860–1935 нм. Дифференциальная эффективность генерации на кристалле NLGM-4.8Tm для  $\pi$ - и  $\sigma$ -поляризации на длинах волн 1910 и 1918 нм составила 27% и 23% соответственно, а перестройка длины волны генерации осуществлена в спектральном диапазоне 1870–1950 нм.*

**Ключевые слова:** перестраиваемая лазерная генерация, ионы  $Tm^{3+}$ , лазерные кристаллы, молибдаты, вольфраматы.

Лазерное излучение в двухмикронной области спектра широко используется в медицине, для мониторинга содержания в атмосфере ряда газов (например,  $NO_2$ ,  $CO_2$ ,  $NH_3$ ), а также в научных исследованиях и в специальной технике. Все это определяет актуальность работ по поиску новых активных сред для получения генерации в данном диапазоне длин волн. В настоящее время для получения двухмикронной генерации широко используются твердотельные матрицы и волоконные световоды, активированные ионами  $Tm^{3+}$  [1–3] либо  $Ho^{3+}$  [4, 5]. Заселение верхнего лазерного уровня  ${}^3F_4$  ионов  $Tm^{3+}$  при получении генерации в двухмикронной спектральной области в лазерных кристаллах происходит в результате процесса кросс-релаксации ( ${}^3H_4 \rightarrow {}^3F_4$ ,  ${}^3H_6 \rightarrow {}^3F_4$ ) при накачке на уровень  ${}^3H_4$ . Подобная схема заселения уровня  ${}^3F_4$  ионов  $Tm^{3+}$  была предложена авторами [6] для получения двухмикронной лазерной генерации в условиях ламповой накачки. В настоящее время эта схема широко используется при накачке тулиевых лазеров коммерческими лазерными диодами с  $\lambda_p \approx 800$  нм.

С целью создания компактных двухмикронных лазеров средней мощности с диодной накачкой внимание исследователей привлекают кристаллы двойных вольфраматов и молибдатов со структурой шеелита, активи-

рованных ионами  $Tm^{3+}$  [7–19]. Вследствие разупорядоченности кристаллической структуры полосы поглощения и люминесценции, обусловленные межмультиплетными переходами, в этих кристаллах значительно неоднородно уширены. Такие полосы поглощения иона активатора обеспечивают лучшее согласование со спектром излучения источников диодной накачки, а широкие полосы люминесценции предполагают возможность получения генерации, плавно перестраиваемой по длине волны излучения, а также потенциальную возможность генерации ультракоротких импульсов в режиме синхронизации мод.

Впервые о генерации  $Tm^{3+}$  в кристаллах двойного вольфрамата  $NaGd(WO_4)_2$  (NGW-Tm) с диодной накачкой сообщается в работе [7]. Чуть позже авторами [8] на кристаллах этого же состава была реализована перестраиваемая генерация при накачке излучением  $Al_2O_3:Ti^{3+}$ -лазером. Двухмикронная генерация при накачке  $Al_2O_3:Ti^{3+}$ -лазером в кристаллах  $NaLa(WO_4)_2:Tm^{3+}$  (NLW-Tm) получена в работе [9]. О генерации  $Tm^{3+}$  на переходе  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$  в кристаллах двойных молибдатов  $NaLa(MoO_4)_2$  (NLM-Tm) и  $NaGd(MoO_4)_2$  (NGM-Tm) при накачке  $Al_2O_3:Ti^{3+}$ -лазером сообщается в работах [16, 17].

Результаты первого эксперимента по получению генерации на кристалле смешанного натрий-лантан-гадолиниевых вольфраматов  $NaLa_{1/2}Gd_{1/2}(WO_4)_2:Tm$  с концентрацией тулия 3.6 ат. % (NLGW-3.6Tm) при диодной накачке представлены нами в [20]. Кристаллы смешанных шеелитоподобных вольфраматов  $NaLa_xGd_{1-x}(WO_4)_2:Tm$  и молибдатов  $NaLa_xGd_{1-x}(MoO_4)_2:Tm$  с вариацией состава La–Gd, занимают промежуточное положение между натриевыми вольфраматами (молибдатами) лантана и гадолиния. Образование твердого раствора между лантаном и гадолинием в редкоземельной подрешетке

Ф.А.Большиков, П.А.Рябочкина. Мордовский государственный университет им. Н.П.Огарева, Россия, 430005 Саранск, ул. Большевикская, 68; email: ryabochkina@freemail.mrsu.ru  
Е.В.Жариков, Д.А.Лис, К.А.Субботин. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: evzh@mail.ru, lisdenis@mail.ru, soubotin@lsk.gpi.ru  
Н.Г.Захаров, О.Л.Антипов. Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: nikitagz@rambler.ru, antipov@appl.sci-nnov.ru

структуры шеелита приводит к дополнительному разупорядочению структуры. Следовательно, здесь можно ожидать еще большего уширения и сглаживания контура полос люминесценции тулия. Нами были проведены исследования спектрально-люминесцентных свойств концентрационных рядов кристаллов  $\text{NaLa}_x\text{Gd}_{1-x}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $x = 0 - 1$ ) и  $\text{NaLa}_x\text{Gd}_{1-x}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $x = 0 - 1$ ) [21], на основе которых сделаны прогнозы о возможности получения в данных кристаллах плавно перестраиваемой в широком диапазоне длин волн генерации на переходе  ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$ . При этом, насколько нам известно, в настоящее время в литературе отсутствует информация о получении генерации тулия в кристаллах двойных молибдатов с вариацией состава La–Gd, а также о получении перестраиваемой лазерной генерации ионов тулия в условиях диодной накачки в каком-либо шеелитоподобном кристалле молибдата или вольфрамата.

В настоящей работе представлены результаты экспериментов по получению плавно перестраиваемой в области 2 мкм одномодовой лазерной генерации на переходе  ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$  в кристаллах NLGW-3.6Tm и  $\text{NaLa}_{1/3}\text{Gd}_{2/3}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  с концентрацией тулия 4.8 ат. % (NLGM-4.8Tm) в условиях диодной накачки.

Кристаллы NLGW-3.6Tm и NLGM-4.8Tm были выращены методом Чохральского из иридиевого тигля в атмосфере  $\text{N}_2 + (1 - 2)$  об. %  $\text{O}_2$  при скорости вытягивания 0.7 мм/ч. Выращенные монокристаллы отжигались на воздухе в течение четырех суток при температуре 800 °С для снятия термических напряжений, а в случае кристалла NLGM-4.8Tm – и для удаления черной окраски, типичной для кристаллов шеелитоподобных молибдатов при их выращивании в недостаточно окисляющей атмосфере [19, 21].

Ориентация выращенных кристаллов относительно оптической оси (главной кристаллографической оси 4-го порядка) в первом приближении задавалась направлением монокристаллической затравки, вырезанной перпендикулярно этой оси. После окончания роста ориентация кристаллов уточнялась на дифрактометре ДРОН-3, а также методом оптической коноскопии в скрещенных николях на поляризационном микроскопе МИН-8. Фактически полученные концентрации компонентов в выращенных кристаллах определялись методом рентгено-спектрального микроанализа на установке SX 100 (CAMECA, Франция).

Активные элементы вырезались из исследуемых кристаллов в форме цилиндров размером  $\varnothing 3 \times 5$  мм таким образом, чтобы оптическая ось кристалла была перпендикулярна оси цилиндра. На торцы активных элементов наносилось просветляющее покрытие на длины волн накачки ( $\lambda_p = 795$  нм) и генерации ( $\lambda_{\text{ген}} = 1910$  нм). Коэффициент остаточного отражения на длине волны накачки составлял 0.7 %, а на длине волны генерации – 0.2 %.

Оптическая схема лазера для получения генерации на переходе  ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$  в кристаллах NLGW-3.6Tm и NLGM-4.8Tm показана на рис.1. В качестве источника накачки при проведении генерационных экспериментов использовалась линейка лазерных диодов 1 мощностью 40 Вт, температура которой поддерживалась на уровне  $\sim 26.5$  °С, что соответствовало длине волны излучения вблизи 794 нм. Для снижения тепловой нагрузки на активный элемент 7 среднюю мощность накачки уменьшали с помощью обтюлятора 5, формирую-

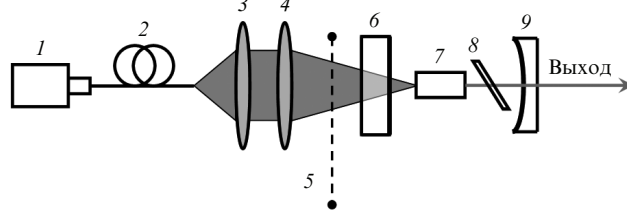


Рис.1. Оптическая схема лазеров на кристаллах NLGW-3.6 Tm, NLGM-4.8 Tm.

щего импульсы накачки длительностью 10 мс с частотой следования 5 Гц. Излучение линейки лазерных диодов с волоконным выходом 2 (диаметр волокна 800 мкм, числовая апертура 0.14) проецировалось внутрь активного элемента с помощью системы линз 3, 4 с фокусными расстояниями равными 5 и 3 см соответственно. Расстояние между линзами составляло 6 см. Линза 3 была расположена на расстоянии 5 см от торца волокна, поэтому она выступала в качестве коллиматорной линзы. Активный элемент располагался в фокусе линзы 4.

Для эффективного охлаждения активный элемент, обернутый индиевой фольгой, помещался в медный радиатор, температура которого поддерживалась постоянной и равной примерно 18 °С. В экспериментах использовался резонатор длиной 5 см, образованный плоским дихроичным зеркалом 6 ( $T(\lambda_p) \approx 90\%$ ,  $T(\lambda_{\text{ген}}) \approx 0.5\%$ ) и плоскогнутым зеркалом 9 ( $T(\lambda_{\text{ген}}) \approx 11\%$ ) с радиусом кривизны сферической поверхности 200 мм. Для выделения лазерного излучения  $\pi$ - либо  $\sigma$ -поляризации внутрь резонатора вносилась стеклянная пластинка 8, установленная под углом Брюстера к оси системы. При проведении эксперимента по получению перестраиваемой генерации на кристалле NLGW-3.6Tm в резонатор лазера вместо стеклянной пластинки устанавливался спектрально-поляризационный фильтр Вуда. Он представлял собой сапфировую пластинку толщиной 5 мм, область свободной дисперсии фильтра составляла 80 нм. При получении перестраиваемой генерации на кристалле NLGM-4.8Tm в качестве фильтра Вуда использовалась кварцевая пластинка толщиной 3 мм с областью свободной дисперсии 160 нм.

Зависимости средней выходной мощности генерации от средней мощности излучения лазерного диода накачки, поглощенной в активном элементе, для  $\pi$ - и  $\sigma$ -поляризации излучения кристаллов NLGW-3.6Tm и NLGM-4.8Tm приведены на рис.2. На рис.3 показано спектральное положение линий генерации для  $\pi$ - и  $\sigma$ -поляризации в кристаллах NLGW-3.6 Tm и NLGM-4.8Tm соответственно. Параметры лазерной генерации на указанных кристаллах для обеих поляризаций представлены в табл.1. Как уже отмечалось, генерация на кристаллах NLGW-Tm в области 2 мкм при лазерной диодной накачке была получена в [2, 3]. Значения дифференциальной эффектив-

Табл.1. Параметры генерации.

Кристалл	Поляризация	Дифференциальная эффективность (%)	Полная эффективность (%)	Длина волны генерации (нм)
NLGW:Tm	$\pi$	34	19	1908
	$\sigma$	30	16	1918
NLGM:Tm	$\pi$	27	15	1910
	$\sigma$	23	12	1918

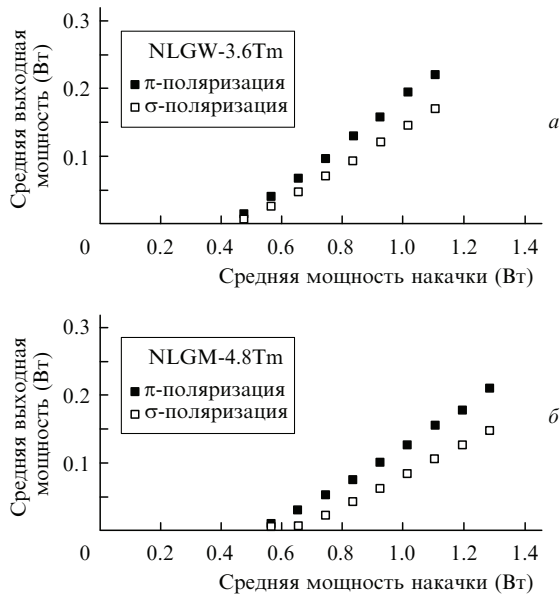


Рис.2. Зависимости средней выходной мощности генерации от средней поглощенной мощности накачки для лазеров на кристаллах  $\text{NaLa}_{1/2}\text{Gd}_{1/2}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}} = 3.6$  ат. %) (а) и  $\text{NaLa}_{1/3}\text{Gd}_{2/3}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}} = 4.8$  ат. %) (б).

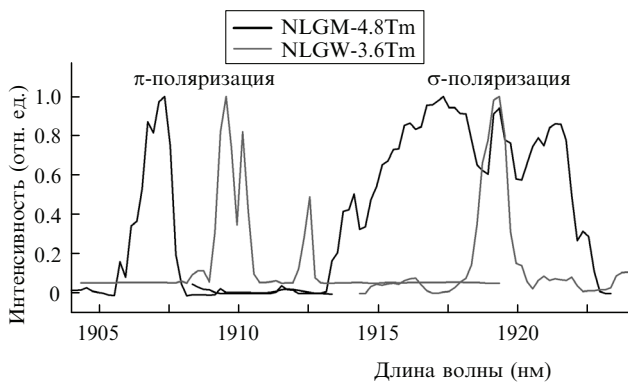


Рис.3. Спектральное положение линий генерации лазеров на кристаллах  $\text{NaLa}_{1/2}\text{Gd}_{1/2}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}} = 3.6$  ат. %) и  $\text{NaLa}_{1/3}\text{Gd}_{2/3}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}} = 4.8$  ат. %).

ности генерации, достигнутые в настоящей работе для кристаллов NLGW-3.6Tm и равные 34 % для π- и 30 % для σ-поляризации, выше таковых, полученных в [2, 3] для кристаллов NGW-Tm. В доступной нам литературе сведения о получении двухмикронной генерации с диодной накачкой в других кристаллах шеелитоподобных молибдатов и вольфраматов, активированных ионами Tm, отсутствуют.

Для многих практических приложений требуются лазеры с плавно перестраиваемой длиной волны излучения. В настоящее время сообщалось о получении лазерной генерации в области 2 мкм на кристаллах NGW-Tm и NLW-Tm только при накачке  $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$ -лазером [3, 4]. Насколько нам известно, результаты по получению перестраиваемой генерации на кристаллах NGM-Tm в настоящее время отсутствуют. Мы провели эксперименты по получению перестраиваемой лазерной генерации на кристаллах NLGW-3.6Tm и NLGM-4.8 Tm с диодной накачкой. Зависимость средней выходной мощности от длины волны генерации для лазера на кристалле NLGW-3.6Tm при средней мощности накачки 1.0 Вт приведена на рис.4,а. Достигнута перестройка длины волны генера-

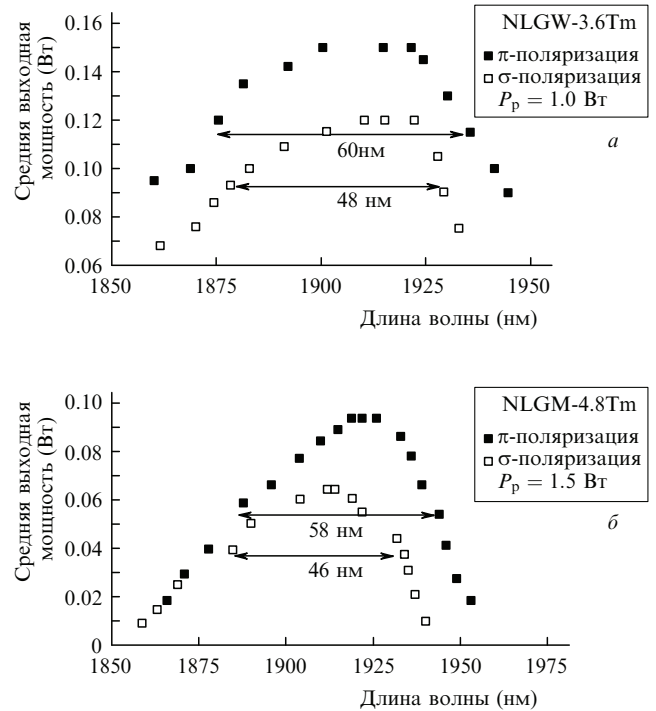


Рис.4. Зависимости средней выходной мощности лазеров на кристаллах  $\text{NaLa}_{1/2}\text{Gd}_{1/2}(\text{WO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}} = 3.6$  ат. %) (а) и  $\text{NaLa}_{1/2}\text{Gd}_{1/2}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  ( $C_{\text{Tm}} = 4.8$  ат. %) (б) от длины волны при различных средних мощностях накачки

ции в диапазоне 1860–1935 нм, полуширина полосы перестройки  $\Delta\lambda$  составляет 60 нм для π- и 48 нм для σ-поляризации. Зависимость средней выходной мощности от длины волны генерации для лазера на кристалле NLGM-4.8Tm при средней мощности накачки 1.5 Вт приведена на рис.4,б. Достигнута перестройка длины волны генерации в диапазоне 1870–1950 нм при  $\Delta\lambda = 58$  нм для π- и 46 нм для σ-поляризации. Таким образом, в настоящей работе на шеелитоподобных кристаллах, активированных ионами тулия, впервые получена плавно перестраиваемая двухмикронная лазерная генерация с диодной накачкой.

С помощью ИК камеры (Pugosam III) было исследовано пространственное распределение пучка лазерной генерации, полученной на кристалле NLGM-4.8Tm; соответствующее распределение интенсивности излучения приведено на рис.5. Коэффициент корреляции между кривой, характеризующей зависимость распределения ин-

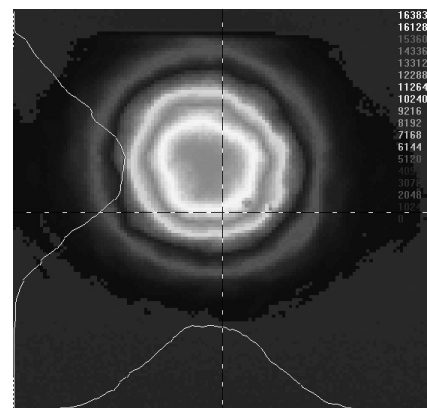


Рис.5. Поперечное распределение интенсивности пучка генерации для лазера на кристалле NLGM-4.8 Tm

тенсивности излучения лазерной генерации, и распределением Гаусса равен 0.9, что свидетельствует о реализации преимущественно одномодового режима генерации.

Таким образом, в настоящей работе впервые сообщается о получении квазинепрерывной лазерной генерации на кристаллах  $\text{NaLa}_{1/3}\text{Gd}_{2/3}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  с концентрацией тулия 4.8 ат. % (NLGM-4.8Tm) при диодной накачке. Средняя выходная мощность излучения лазера на кристаллах NLGM-4.8Tm превысила 200 мВт при дифференциальной эффективности 27 % ( $\pi$ -поляризация) и 23 % ( $\sigma$ -поляризация). На этих кристаллах получена перестраиваемая генерация. Область перестройки длины волны генерации в диапазоне 1870–1950 нм составила 58 и 46 нм для  $\pi$ - и  $\sigma$ -поляризаций соответственно. Для кристаллов  $\text{NaLa}_{1/2}\text{Gd}_{1/2}(\text{MoO}_4)_2:\text{Tm}$  с концентрацией тулия 3.6 ат. % (NLGW-3.6Tm) реализована перестройка длины волны генерации в диапазоне 1860–1935 нм с полупириной полосы перестройки 60 нм ( $\pi$ -поляризация) и 48 нм ( $\sigma$ -поляризация).

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.. Номер госконтракта 14.740.11.0071.

1. Suni P.J.M., Henderson S.W. *Opt. Lett.*, **16** (11), 817 (1991).
2. Stoneman R.C., Esterowitz L. *Opt. Lett.*, **15** (9), 486 (1990).
3. Jiangxi Xu, Mahendra Prubhu, Jianren Lu, Ken-ichi Ueda, Da Xing. *Appl. Opt.*, **40** (12), 1983 (2001).
4. Захаров Н.Г., Антипов О.Л., Шаров В.В., Савикин А.П. *Квантовая электроника*, **40** (2), 98 (2010).
5. Курков А.С., Е.М. Шолохов, Маракулин А.В., Минашина Л.А. *Квантовая электроника*, **40** (5), 386 (2010).
6. Антипенко Б.М., Бученков В.А., Киселева Т.И. и др. *Письма в ЖТФ*, **15**, 80 (1989).
7. Жариков Е.В., Лис Д.А., Попов А.В., Субботин К.А. и др. *Квантовая электроника*, **36** (6), 515 (2006).
8. Cano-Torres J.M., Serrano M.D., Zaldo C., et al. *J. Opt. Soc. Am. B*, **23**, 2494 (2006).
9. Cano-Torres J.M., Han X., Garcia-Cortes A., Serrano M.D., et al. *Mater. Sci. Engin. B*, **146** (22), 2494 (2008).
10. Воронько Ю.К., Субботин К.А., Лис Д.А., Попов А.В. и др. *Оптика и спектроскопия*, **100** (4), 656 (2006).
11. Wei Y., Tu C., Wang H., Yang F., et al. *Appl. Phys. B*, **86**, 529 (2007).
12. Wang H., Jia G., Yang F., Wei Y., et al. *Appl. Phys. B*, **83**, 579 (2006).
13. Bolschikov F.A., Kuz'micheva G.M., Lis D.A., Papin Yu. M., Popov A.V., Ryabochkina P.A., et al. *J. Cryst. Growth*, **311**, 4171 (2009).
14. Merkle L.D., Gruber J.B., Seltzer M.D., Stevens S.B., Allik T.H. *J. Appl. Phys.*, **72** (9), 4269 (1992).
15. Воронько Ю.К., Жариков Е.В., Лис Д.А., Попов А.В., Смирнов В.А., Субботин К.А. *ФТТ*, **50** (9), 1547 (2008).
16. Guo W., Chen Y., Lin Y., Gong X., Luo Z., Huany Y. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **41**, 115409 (2008).
17. Guo W., Chen Y., Lin Y., Gong X., Luo Z., Huany Y. *J. Appl. Phys.*, **103**, 093106 (2008).
18. Воронько Ю.К., Жариков Е.В., Лис Д.А., Попов А.В., Смирнов В.А., Субботин К.А., Хромов М.Н., Воронов В.В. *Оптика и спектроскопия*, **105** (4), 592 (2008).
19. Kuz'micheva G.M., Lis D.A., Subbotin K.A., Rybakov V.B., Zharikov E.V. *J. Cryst. Growth*, **275**, e1835 (2005).
20. Большиков Ф.А., Жариков Е.В., Захаров Н.Г., Лис Д.А., Рябочкина П.А., Субботин К.А., Антипов О.Л. *Квантовая электроника*, **40** (2), 101 (2010).
21. Большиков Ф.А., Жариков Е.В., Лис Д.А., Попов А.В., Рябочкина П.А., Сенин В.Г., Субботин К.А. *Оптика и спектроскопия*, **108** (5), 786 (2010).