

Многоволновая УФ–ИК лазерная установка на основе композитных кристаллов ванадатов $Nd:YVO_4-YVO_4$, вырезанных вдоль оси a , для σ -поляризации излучения*

А.А.Сироткин

Проведены экспериментальные исследования генерационных свойств композитных кристаллов ванадатов $Nd:YVO_4-YVO_4$, вырезанных вдоль оси a , для π - и σ -поляризаций излучения на переходе ${}^4F_{3/2}-{}^4I_{11/2}$. Исследованы поляризационные зависимости генерации $Nd:YVO_4-YVO_4$ -лазеров в режиме пассивной модуляции с затвором $Cr^{4+}:YAG$. Показано, что наиболее эффективно лазер работает в случае σ -поляризованного излучения (минимальная длительность импульса менее 1.5 нс, максимальная пиковая мощность до 25 кВт, максимальная пиковая энергия около 52 мкДж при эффективности до 32%). Продемонстрировано преобразование излучения во вторую и четвертую гармоники. На основе исследований создана многоволновая лазерная установка бактерицидного и терапевтического действия для лечения заболеваний широкого спектра.

Ключевые слова: композитные кристаллы ванадатов, пассивная модуляция добротности, генерация гармоник.

1. Введение

В настоящее время УФ источники лазерного излучения широко используются в технологических, научных и медицинских приложениях. Одно из интересных применений в биологии и медицине – действие УФ лазерного излучения низкой интенсивности на различные микроорганизмы. Лечение больных, страдающих фиброзно-кавернозным туберкулезом легких, по-прежнему является сложной и актуальной проблемой в современной медицине. В Центральном научно-исследовательском институте туберкулеза (ЦНИИТ) совместно с Институтом общей физики РАН проведены исследования по воздействию УФ излучения лазера на различные культуры микроорганизмов. В частности, был разработан метод эндокавитарного лазерного облучения для лечения больных туберкулезом легких. Первоначально использовался УФ азотный лазер (337 нм) [1]. Однако известно [2], что пик бактерицидной активности лежит в диапазоне длин волн 200–300 нм. Эксперименты с лазерным излучением на длине волны 266 нм подтвердили более высокую эффективность действия этого излучения на микроорганизмы. Дальнейшие исследования показали, что еще более эффективным для этих целей является комбинированное воздействие многоволнового лазерного излучения в ультрафиолетовом, видимом и инфракрасном диапазонах длин волн [3].

Таким образом, представляется целесообразным создать дешевые и простые многоволновые (УФ–видимый–ИК) лазерные медицинские системы с целью дальнейшего развития различных методов лазерного воздействия на микроорганизмы для лечения пациентов, страдающих туберкулезом и другими заболеваниями.

* Доложена на Международной конференции Advanced Laser Technologies 2011 (ALT'11), Болгария, 2011 г.

А.А.Сироткин. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: saa@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 28 ноября 2011 г., после доработки – 11 марта 2012 г.

Известна многоволновая лазерная установка бактерицидного и терапевтического действия для лечения гнойно-воспалительных процессов в мягких тканях и внутренних органах на основе твердотельного лазера с активной (акустооптической или электрооптической) модулирующей добротности [3]. Используемые в качестве модулятора акустооптический и электрооптический затворы требуют применения специальных генераторов управляющего напряжения, что приводит к дополнительному энергопотреблению и увеличению массогабаритных параметров установки. Кроме того, такие затворы и системы их управления достаточно дороги. Помимо этого, генератор синусоидального напряжения для акустооптического затвора является мощным источником высокочастотного (50–80 МГц) сигнала, а генераторы управления электрооптического затвора требуют высокого напряжения (2–4 кВ).

Наиболее дешевое и простое решение создания требуемых лазерных медицинских систем – это использование пассивных затворов, например, на кристаллах $Cr^{4+}:YAG$ или $V^{3+}:YAG$. Кристаллы ванадатов (иттриевого YVO_4 [4], гадолиниевого $GdVO_4$ [5], а также смешанных $Nd:Gd_{1-x}Y_xVO_4$ [6] и $Nd:Sc_{1-x}Y_xVO_4$ [7]) – прекрасные материалы для создания лазеров с диодной накачкой.

В работе [8] нами исследованы поляризационные (для π - и σ -поляризаций) зависимости генерации лазеров на кристаллах $Nd:YVO_4$, $Nd:GdVO_4$, $Nd:Gd_{1-x}Y_xVO_4$ и $Nd:Sc_{1-x}Y_xVO_4$ в режиме пассивной модуляции добротности с затворами $Cr^{4+}:YAG$ и $V^{3+}:YAG$. Показано, что наиболее эффективно эти лазеры работают в режиме пассивной модуляции с затворами $Cr^{4+}:YAG$ в случае σ -поляризации. При этом в случае π -поляризации генерировалась последовательность импульсов, длительность и частота которых были на порядок выше, чем для σ -поляризованного излучения. Энергия в импульсе и пиковая мощность излучений также значительно различались. Поэтому и эффективность преобразования во вторую и четвертую гармоники для σ -поляризованного излучения должна быть значительно выше.

Преобразование частоты в нелинейных кристаллах определяется качеством излучения, которое, в свою оче-

редь, сильно зависит от термической линзы в активном элементе лазера. Для снижения влияния термолинзы обычно используется накачка в основное состояние [9, 10], применение композитных кристаллов [11, 12], модуляция излучения накачки [13].

Цель настоящей работы – проведение экспериментальных исследований лазера на основе композитных кристаллов иттриевых ванадатов $Nd:YVO_4-YVO_4$ с σ -поляризацией излучения и пассивной модуляцией добротности затвором $Cr^{4+}:YAG$, а также реализация эффективного преобразования излучения во вторую и четвертую гармоники. Актуальность данной работы определяется задачей создания компактной и дешевой многоволновой медицинской лазерной установки бактерицидного и терапевтического действия для лечения заболеваний широкого спектра, обеспечивающей за счет конструктивного исполнения повышенную мощность излучения в ИК, видимом и УФ диапазонах длин волн, а также малые массогабаритные характеристики и высокую степень безопасности для обслуживающего персонала и пациентов.

2. Пассивная модуляция добротности

В настоящей статье приведены результаты исследования работы лазеров на основе композитных кристаллов ванадатов $Nd:YVO_4-YVO_4$, вырезанных вдоль оси a , для σ -поляризации излучения на переходе ${}^4F_{3/2}-{}^4I_{11/2}$ как в непрерывном режиме, так и в режиме пассивной модуляции добротности. Особенностью работы с σ -поляризованным излучением является необходимость применения селективных устройств для отделения от излучения π -поляризации, для которого сечение люминесценции в пять раз больше. Для разделения π - и σ -поляризаций использовалась схема [8], основанная на двулучепреломлении кристаллов ванадатов (рис.1).

В качестве лазерных активных элементов (АЭ) мы использовали вырезанные вдоль оси a кристаллы иттриевого ванадата с концентрацией ионов неодима 1.1 ат. % размерами $4 \times 4 \times 2$ мм и композитные кристаллы $Nd:YVO_4-YVO_4$ с такой же концентрацией ионов неодима размерами $4 \times 4 \times (2+4)$ мм (длина нелегированной части композитного кристалла составляла 2 мм). Одна грань активных элементов была закошена на угол $\sim 2^\circ$ для разделения излучений π - и σ -поляризаций. Высокая атомная концентрация ионов неодима взята из соображений реализации минимальной длины резонатора для снижения длительности импульса.

Лазерный кристалл, обернутый индиевой фольгой, был вмонтирован в медный блок, охлаждаемый водой. Кристалл возбуждался излучением лазерной диодной линейки LIMO HLU30F200 с волоконным выводом (диаметр волокна 200 мкм, числовая апертура $NA = 0.22$), максимальная мощность излучения составляла до 30 Вт. Излучение

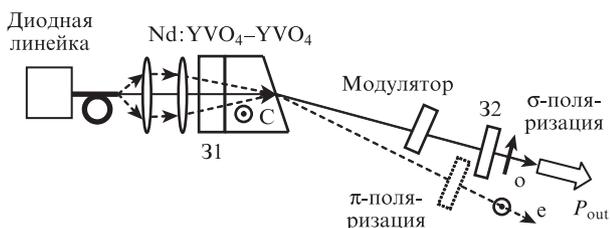


Рис.1. Схема разделения поляризаций за счет двулучепреломления в кристаллах ванадатов.

накачки фокусировалось в активном элементе в пятно диаметром 250–400 мкм.

Резонатор лазера был образован глухим плоским зеркалом 31 (диэлектрическое покрытие с высоким отражением на длине волны 1064 нм и просветлением на длине волны излучения накачки 808 нм) на грани АЭ и плоским выходным зеркалом 32 (с пропусканием $T = 15\%$ на основной частоте). Другая сторона АЭ просветлена для излучения с $\lambda = 808$ и 1064 нм ($R \approx 0.02\%$).

Для реализации импульсного режима $Nd:YVO_4-YVO_4$ -лазера в качестве пассивного затвора использовались кристаллы $Cr^{4+}:YAG$. Оптимальные начальное пропускание модулятора и пропускание выходного зеркала на длине волны 1.06 мкм составляли 80% и 25% соответственно. Длина резонатора для АЭ на кристаллах $Nd:YVO_4$ и композитных кристаллах $Nd:YVO_4-YVO_4$ была около 5 и 10 мм соответственно.

На рис.2 приведены мощностные характеристики $Nd:YVO_4$ - и $Nd:YVO_4-YVO_4$ -лазеров в непрерывном и импульсном режимах генерации. Дифференциальная эффективность достигала 62% и 31.5% в непрерывном и импульсном режиме соответственно. Для АЭ на кристаллах $Nd:YVO_4$ влияние термолинзы сказывалось при поглощенной мощности накачки более 3 Вт.

На рис.3 представлены результаты измерений характеристик лазерного излучения (длительности импульса, частоты повторения импульсов, энергии в импульсе и пи-

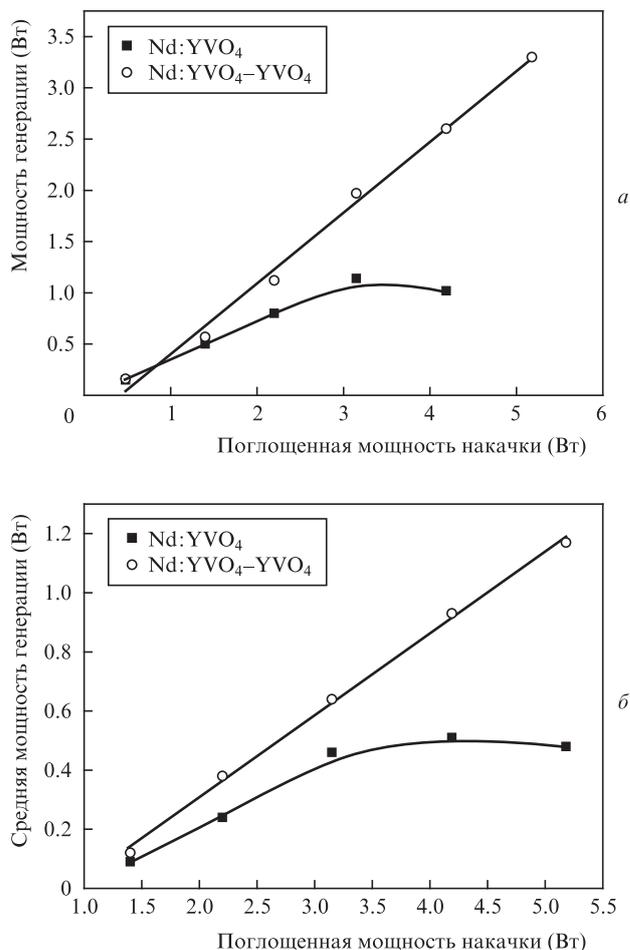


Рис.2. Средняя мощность излучения $Nd:YVO_4$ - и $Nd:YVO_4-YVO_4$ -лазеров в непрерывном (а) и импульсном (с пассивным затвором $Cr^{4+}:YAG$) (б) режимах. Толщина АЭ $Nd:YVO_4$ -лазера 2 мм.

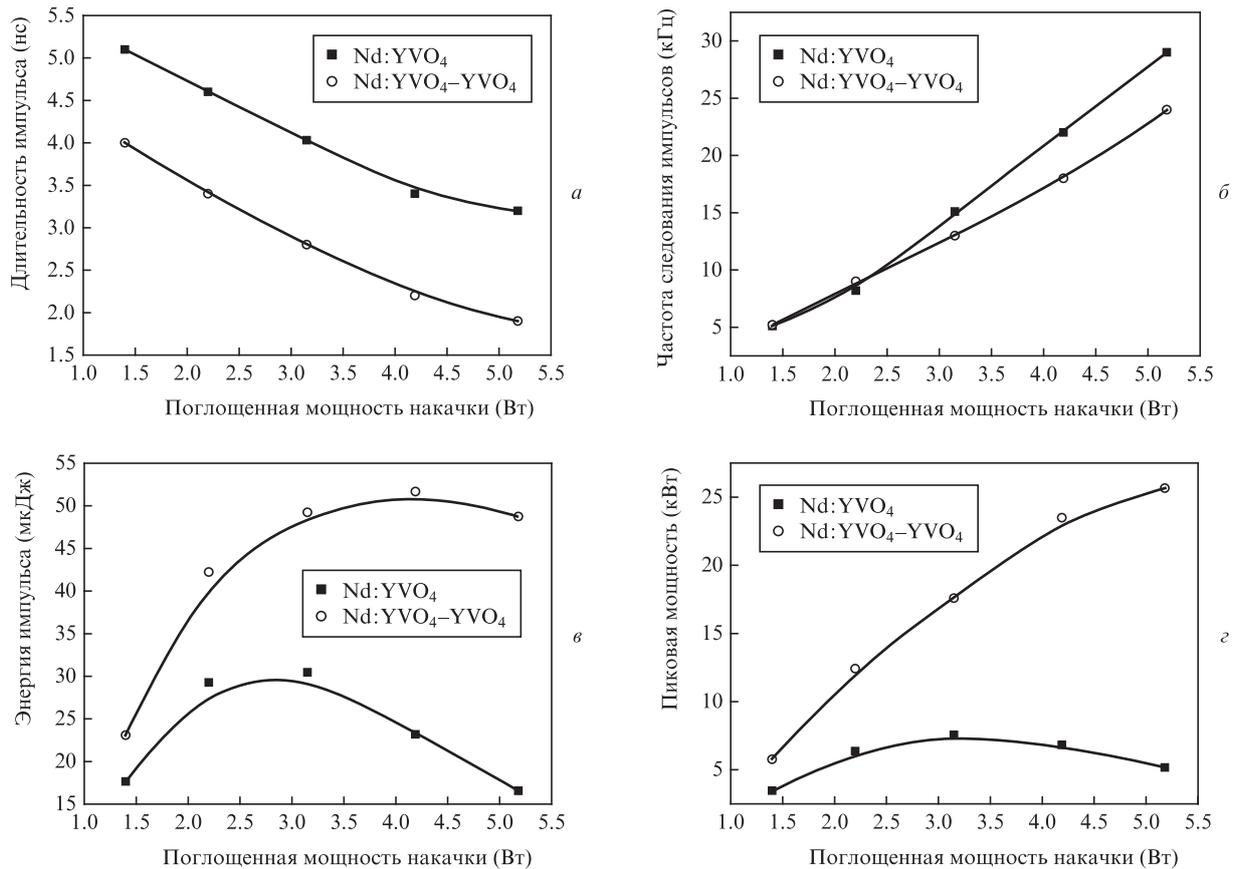


Рис.3. Зависимости длительности импульса (а), частоты следования (б), энергии в импульсе (в) и пиковой мощности (г) Nd:YVO₄- и Nd:YVO₄-YVO₄-лазеров с пассивным Cr⁴⁺:YAG-затвором для σ-поляризации излучения от поглощенной мощности накачки. Толщина АЭ Nd:YVO₄-лазера 2 мм.

ковой мощности) Nd:YVO₄- и Nd:YVO₄-YVO₄-лазеров для σ-поляризации в режиме пассивной модуляции добротности. Лазеры генерируют устойчивую последовательность импульсов стабильной амплитуды и частоты практически во всем диапазоне накачек. Минимальная длительность импульса 1.5 нс была получена для Nd:YVO₄-лазера (толщина АЭ 2 мм) при частоте следования импульсов 15–20 кГц. Максимальная импульсная мощность более 25 кВт при энергии в импульсе выше 52 мкДж достигнута для АЭ на композитных кристаллах Nd:YVO₄-YVO₄. Таким образом, из рис.3 видно, что использование композитных кристаллов предпочтительнее из-за снижения влияния термлинзы на генерационные параметры лазеров. При более длинных импульсах на этих кристаллах удается получить бльшие энергию и мощность в импульсе.

3. Преобразование частоты излучения

Высокие пиковые мощности лазеров на кристаллах ванадатов Nd:YVO₄-YVO₄, вырезанных вдоль оси *a*, с пассивным затвором Cr⁴⁺:YAG позволяют реализовать эффективное преобразование излучения в видимый и УФ диапазоны длин волн. Нами были исследованы три схемы преобразования в четвертую гармонику (рис.4).

Для преобразования излучения во вторую гармонику использовался нелинейный кристалл КТР, размещенный непосредственно за выходным зеркалом лазера 32. Кристалл монтировался на микрохолодильнике Пельтье, его температура стабилизировалась с погрешностью ±0.1 °С. Для преобразования излучения в четвертую гармонику

использовались нелинейные кристаллы ВВО без термостабилизации.

В схеме 1 кристаллы КТР (3×3×10 мм) и ВВО (3×3×7 мм) располагались друг за другом соосно непосредственно вблизи выходного зеркала. Преобразование осуществлялось за один проход. Резонатор лазера длиной 12 мм состоял из зеркала на активном элементе 31 (высокое отражение на λ ≈ 1.06 мкм и просветление на 808 нм) и зеркала 32 с отражением 85%. При поглощенной мощности накачки 5.2 Вт средняя мощность на основной частоте ω составляла 740 мВт, на частоте 2ω – 124 мВт и на частоте 4ω – 5.2 мВт (см. рис.5).

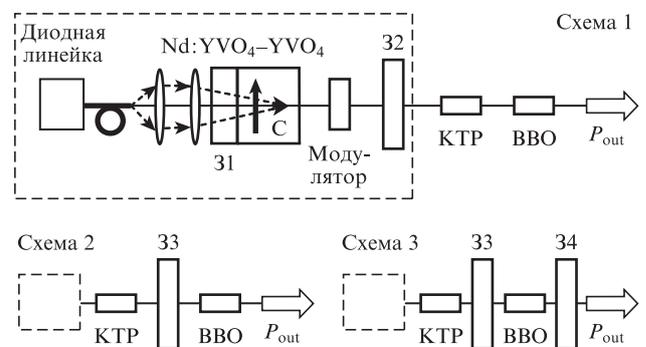


Рис.4. Схема УФ лазера с пассивной модуляцией добротности на основе кристаллов ванадатов, вырезанных вдоль оси *a*, для σ-поляризации (схема 1), с внутрирезонаторным преобразованием во вторую гармонику (схема 2) и с внутрирезонаторным преобразованием во вторую гармонику и многопроходным преобразованием в четвертую гармонику (схема 3).

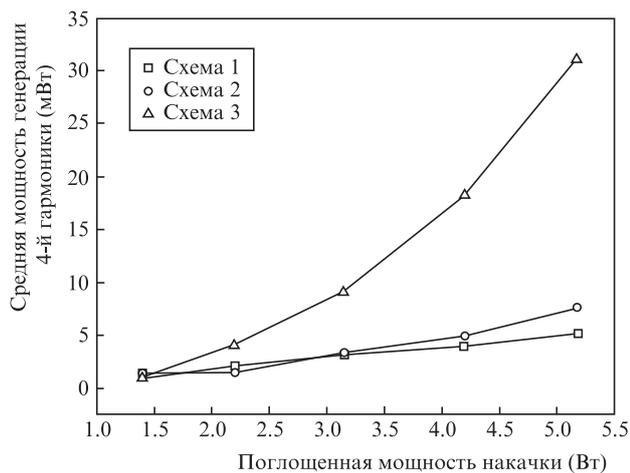


Рис.5. Зависимость мощности генерации четвертой гармоники от поглощенной мощности накачки для трех схем преобразования (рис.4).

В схеме 2 реализовано внутрирезонаторное преобразование во вторую гармонику и однопроходное – в четвертую. В этом случае длина резонатора была увеличена до 32 мм, чтобы включить кристалл КТР и возвратное зеркало 32 (высокое отражение на $\lambda \approx 0.53$ мкм и просветление на $\lambda \approx 1.06$ мкм) в резонатор. Выходным зеркалом служило зеркало 33 (высокое отражение на $\lambda \approx 1.06$ мкм и просветление на $\lambda \approx 0.53$ мкм). В результате увеличения длины резонатора и внесения дополнительных внутрирезонаторных потерь длительность импульса возросла. При этом средняя мощность излучения на второй гармонике достигала 364 мВт, а на четвертой – 7.4 мВт (рис.5).

В схеме 3 осуществлено внутрирезонаторное преобразование во вторую гармонику и многопроходное [14] – в четвертую. На зеркало 33 наносилось покрытие с высоким отражением на 0.266 мкм, а на 34 – с высоким отражением на $\lambda \approx 0.53$ мкм и просветлением на $\lambda \approx 0.266$ мкм. За счет многопроходового преобразования в кристалле ВВО средняя мощность излучения на четвертой гармонике достигала 32.2 мВт (рис.5).

Таким образом, схема 2 при более сложном резонаторе дает незначительное увеличение преобразования в четвертую гармонику. Для реализации УФ лазера мощностью до 5 мВт более выгодно использовать схему 1. Для реализации средних мощностей до 30 мВт и выше необходимо использовать более сложную схему 3, как более эффективную.

4. Лазерная медицинская установка «Ливадия»

Многоволновая лазерная установка бактерицидного и терапевтического действия для лечения инфекционных заболеваний «Ливадия», выполненная на основе композитных кристаллов ванадатов Nd:YVO₄–YVO₄, вырезанных вдоль оси *a* для σ -поляризации, работает в режиме модуляции добротности на пассивном затворе Cr⁴⁺:YAG. Установка «Ливадия» содержит лазерный излучатель, представляющий собой твердотельный лазер с продольной на-

качкой полупроводниковым диодом и пассивной модуляцией добротности, источник питания, систему управления, преобразователь излучения в видимую и УФ области спектра на нелинейных кристаллах, систему выделения участков спектра и оптоволоконную систему транспортировки лазерного излучения.

5. Заключение

Проведены экспериментальные исследования генерационных свойств композитных кристаллов ванадатов Nd:YVO₄–YVO₄, вырезанных вдоль оси *a*, для σ -поляризации излучения на переходе ⁴F_{3/2}–⁴I_{11/2}.

Исследованы поляризационные зависимости генерации Nd:YVO₄–YVO₄-лазеров в режиме пассивной модуляции добротности с затворами Cr⁴⁺:YAG. Получены следующие характеристики: минимальная длительность импульса менее 1.5 нс, максимальная пиковая мощность до 10 кВт, максимальная пиковая энергия около 52 мкДж при дифференциальном КПД до 32%. Реализовано эффективное преобразование частоты излучения в видимый и УФ диапазоны длин волн.

Полученные результаты положены в основу разработки лазерной медицинской установки «Ливадия», которая предназначена для подавления развития патогенной микрофлоры в очагах гнойно-воспалительных процессов в мягких тканях, слизистой оболочке и внутренних органах человека и одновременной стимуляции репаративных процессов в тканях с использованием многоволнового лазерного излучения в УФ, видимом и ИК диапазонах длин волн. Установка может быть также использована для выполнения терапевтических процедур в условиях лечебных, лечебно-профилактических и научно-исследовательских медицинских учреждений различного профиля.

Работа выполнена при поддержке ООО «Новые Энергетические Технологии».

1. Prokhorov A.M., Kuzmin G.P., Kisletsov A.V., Zakharov V.P., Dobkin V.G. *Laser Phys.*, **6**, 420 (1996).
2. Apollonov V.V., Konstantinov K.V., Sirotkin A.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3829**, 135 (1999).
3. Перельман М.И., Ночевник М.Н., Стрельцов В.П., Рившин М.М., Семенов Г.И., Сироткин А.А. *Патент RU № 2234349 C1*, от 20.08.2004.
4. O'Connor J.R. *Appl. Phys. Lett.*, **9**, 407 (1966).
5. Загуменный А.И., Остроумов В.Г., Щербakov И.А., Йенсен Т., Мейен Я.П., Хубер Г. *Квантовая электроника*, **22**, 1071 (1992).
6. Qin L., Meng X., Du Ch., Zhu L., Xu B., Shao Z., Liu Zh., Fang Q., Cheng R. *J. Alloys and Compounds*, **354**, 259 (2003).
7. Zagumennyi A.I., Kutovoi S.A., Sirotkin A.A., Kutovoi A.A., Vlasov V.I., Iskhakova L.D., Zavartsev Y.D., Luthy W., Feurer T. *Appl. Phys. B*, **99**, 159 (2010).
8. Сироткин А.А., Власов В.И., Загуменный А.И., Заварцев Ю.Д., Кутовой С.А. *Квантовая электроника*, **41** (7), 584 (2011).
9. Sato Y., Taira T., Pavel N., Lupei V. *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 844 (2003).
10. Lupei V., Pavel N., Sato Y., Taira T. *Opt. Lett.*, **28**, 2366 (2003).
11. Tsunekane M., Taguchi N., Inaba H. *Electron. Lett.*, **32**, 40 (1996).
12. Weber R., Neuenschwander B., Weber H.P., *Techn. Dig. CLEO Europe (OSA)*, 1996, paper CMA4).
13. Wang B., Qi Y., Zhang G., Fang T., Yan B.X., Wang Y.W., Bi Y., Sun M.Y., Zang C.H. *Laser Phys.*, **21**, 656 (2011).
14. Zhuang F., Ye N., Huang Ch., Zhu H., Wei Y., Chen Zh., Wang H., Zhang G. *Opt. Express*, **18**, 25339 (2010).