

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА ДВУХМИКРОННОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ Tm:YLF И Ho:YAG АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

*С. Д. Великанов, К. В. Воронцов, Н. Г. Захаров, А. В. Ларионов,
Г. Н. Номаконов, Ю. Н. Фролов, В. Б. Коломеец, В. А. Гарюткин*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» ИЛФИ, г. Саров Нижегородской обл.

Спектральный диапазон излучения тулиевых лазеров сосредоточен в области длин волн $\sim 1,9$ мкм и подходит для применения в различных сферах: медицине, технологических и научных приложениях, в том числе для накачки кристаллических гольмиевых сред. Последние, в свою очередь, являются эффективными источниками накачки параметрических генераторов света, преобразующих излучение в средний и дальний ИК диапазоны [1–3]. Данная схема многокаскадного преобразования излучения лежит в основе конструкции опытных образцов излучателей, разрабатываемых в ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Известно, что альтернативой волоконным тулиевым лазерам являются лазеры с активным элементом (АЭ) из кристалла тетрафторида иттрия-лития $YLiF_4$, легированного ионами тулия Tm, – Tm:YLF лазеры. При сравнимых с волоконным тулиевым лазером параметрах выходного излучения ожидаемая эффективность Tm:YLF лазера может быть в полтора раза выше. Отметим, что разработку Tm:YLF лазера возможно реализовать исключительно на отечественных комплектующих.

В последние годы лазеры на основе кристаллов Tm:YLF с диодной накачкой исследуются многими научными группами различных стран мира. Так в работах [4, 5] показано, что в лазере на одном цилиндрическом АЭ максимальная мощность генерации может достигать ~ 30 Вт. В работе [5] увеличение мощности генерации до 55 Вт было реализовано при введении в резонатор двух цилиндрических АЭ с концентрацией ионов Tm^{3+} $3\div 3,5$ ат. %. Существенный недостаток такого лазера – необходимость применения четырёх диодных источников накачки, что сильно усложняет оптическую схему. Дальнейшее увеличение выходной мощности в данной схеме ограничивалось термомеханической прочностью кристаллов. Другой подход получения высокой мощности генерации – переход к АЭ прямоугольной формы [6, 7]. В работе [7] было получено ~ 190 Вт с одного прямоугольного АЭ. Однако расходимость излучения такого лазера вдоль широкой грани АЭ в сотни раз превышает дифракционное значение, что ограничивает возможности его эффективного применения для накачки гольмиевого лазера.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований Tm:YLF лазера на одном цилиндрическом АЭ с концентрацией ионов тулия 2 ат. % и результаты применения Tm:YLF лазера для накачки Ho:YAG лазера.

1. Исследования Tm:YLF лазера

1.1. Экспериментальная установка. Исследования генерационных характеристик лазера на основе цилиндрического АЭ Tm:YLF с двухсторонней аксиально-симметричной продольной диодной накачкой проводились на экспериментальной установке, схема которой изображена на рис. 1.

Резонатор Tm:YLF лазера был построен по Г-образной схеме, состоящей из трех зеркал: дихроичных плоских зеркал M_1 и M_2 и выходного сферического зеркала M_3 . Такая схема компактна, позволяет реализовать двухстороннюю накачку АЭ без дополнительных оптических элементов. Для обеспечения линейной поляризации излучения зеркало M_2 вносило дискриминацию по поляризации (4 % потерь за проход). Зеркала M_1 и M_2 имели высокое пропускание на длине волны накачки 792 нм и высокое отражение на длине волны генерации ~ 1900 нм. Физическая длина резонатора составляла 120 мм.

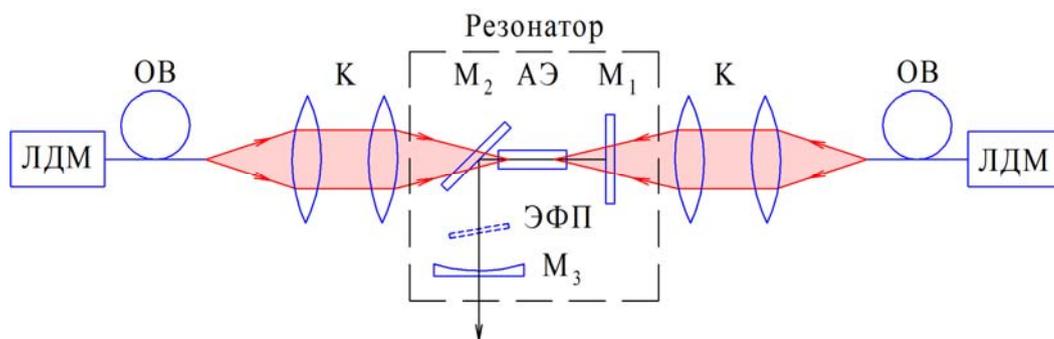


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: ЛДМ – лазерный диодный модуль, ОВ – оптическое волокно, К – двухлинзовый конденсор, M_1 , M_2 – дихроичные плоские зеркала, M_3 – выходное сферическое зеркало, АЭ – активный элемент, ЭФП – эталон Фабри-Перо

В экспериментах использовался активный элемент $Tm:YLF$ диаметром 3 мм и длиной 24 мм, выращенный методом Бриджмена-Стокбаргера, с концентрацией ионов Tm^{3+} 2 ат. %. АЭ был вырезан в виде цилиндра перпендикулярно направлению оптической оси кристалла. На торцы кристалла были нанесены просветляющие покрытия на длины волн накачки генерации. АЭ через индиевую фольгу закреплялся в медный радиатор с поддерживаемой на постоянном уровне температурой (около 15 °С).

$Tm:YLF$ является анизотропным одноосным кристаллом, поэтому его оптические свойства зависят от ориентации относительно поляризации излучения. Для получения генерации на длине волны ~ 1909 нм кристалл $Tm:YLF$ ориентировался таким образом, чтобы дихроичное зеркало M_2 вносило наименьшие потери для σ -поляризации (плоскость поляризации волны ортогональна оптической оси). При повороте АЭ на 90° реализовывалась генерация на π -поляризации с длиной волны ~ 1890 нм. Для точной настройки спектра генерации на максимумы поглощения кристаллов $Ho:YAG$ (1907,5 нм) и $Ho:YLF$ (1892 нм) осуществлялась внутррезонаторная спектральная селекция излучения путём установки внутри резонатора эталона Фабри-Перо (ЭФП), представляющего собой пластинку из плавленого кварца толщиной 100 мкм и имеющего область свободной дисперсии $\sim 12,6$ нм.

Накачка АЭ осуществлялась непрерывным излучением лазерных диодных модулей (ЛДМ). Излучение ЛДМ транспортировалось с помощью оптического волокна (ОВ). ЛДМ имели максимальную мощность 100 Вт, ширину спектра по полувысоте 2 нм, и параметр распространения пучка $M^2 \sim 250$. Излучение накачки после ОВ фокусировалось в кристалл через дихроичные зеркала M_1 и M_2 с помощью двухлинзовых конденсоров в диаметр 1,1 мм.

Для обеспечения высокой эффективности накачки центр линии генерации ЛДМ при всех мощностях излучения настраивался на максимум поглощения кристалла $Tm:YLF$ путём подстройки температуры ЛДМ. Термостабилизация осуществлялась системой на основе элементов Пельтье с электронным контролем температуры.

Мощность лазерного излучения измерялась термпарным калориметрическим датчиком, подключенным к измерителю (погрешность не более ± 3 %). Спектр излучения измерялся с помощью спектрографа, имевшего разрешение 0,2 нм, синхронного усилителя и датчика.

1.2. Исследования $Tm:YLF$ лазера, работающего на σ -поляризации. Для оптимизации выходной мощности и эффективности генерации $Tm:YLF$ лазера, в экспериментах использовались выходные зеркала как с различными коэффициентами отражения ($R = 90$ %, 85 % и 80 %), так и с различными радиусами кривизны ($R = 200$ мм, 300 мм и 500 мм).

На рис. 2 представлены зависимости мощности σ -поляризованного излучения $Tm:YLF$ лазера от мощности накачки при различных коэффициентах отражения выходного зеркала с радиусом кривизны $R = 300$ мм.

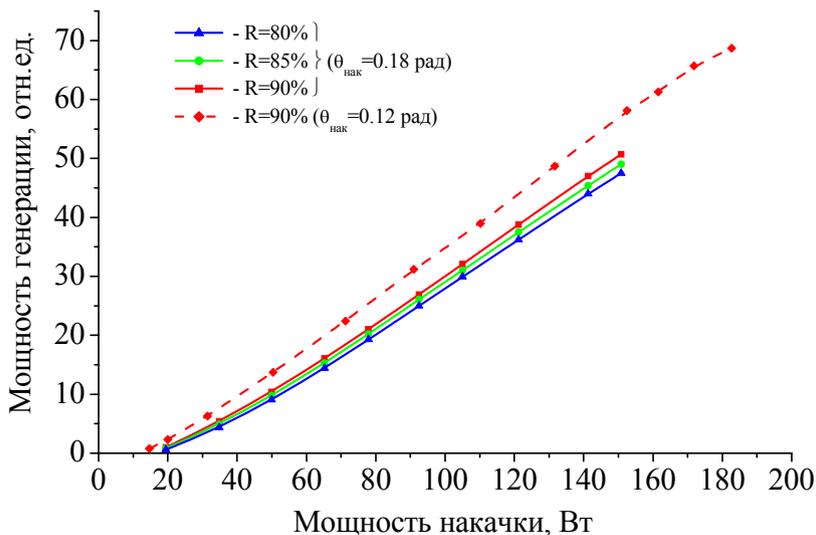


Рис. 2. Зависимости мощности σ -поляризованного излучения Tm:YLF лазера от мощности накачки при разных коэффициентах отражения зеркала M_3 с $R = 300$ мм: 1 – $R = 90\%$, 2 – $R = 85\%$, 3 – $R = 80\%$

Под мощностью накачки понимается мощность, падающая непосредственно на кристалл. Из зависимостей видно, что увеличение коэффициента отражения приводит к незначительному снижению порога и увеличению дифференциальной эффективности генерации. Наибольшая эффективность генерации получена при коэффициенте отражения выходного зеркала $R = 90\%$. Применение выходных зеркал с радиусами кривизны $R = 200$ мм и $R = 500$ мм не приводило к изменению эффективности генерации Tm:YLF лазера.

Спектральный анализ излучения Tm:YLF лазера показал, что длина волны генерации находилась в диапазоне $1907 \div 1911,5$ нм и зависела от добротности резонатора и мощности накачки. При уменьшении добротности резонатора ($R = 80\%$) происходило смещение спектра генерации в коротковолновую область. Спектры генерации имели изрезанную структуру, что обусловлено их совпадением с линиями поглощения паров воды в атмосфере.

Для эффективной накачки кристалла Ho:YAG необходимо, чтобы спектр генерации Tm:YLF лазера совпадал с максимумом поглощения кристалла ($\sim 1907,5$ нм). Для управления спектром излучения Tm:YLF лазера в резонатор устанавливался ЭФП. Спектры σ -поляризованного излучения Tm:YLF лазера с установленным в резонатор ЭФП и без него представлены на рис. 3.

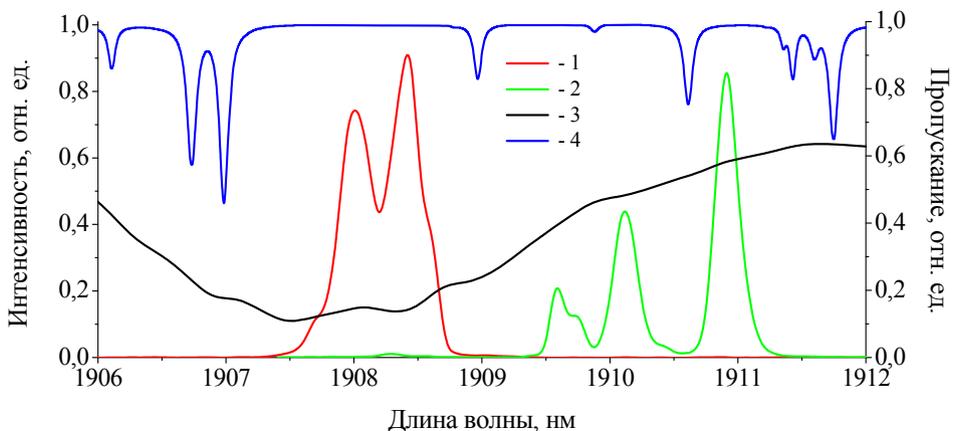


Рис. 3. Спектры σ -поляризованного излучения Tm:YLF лазера с ЭФП (1) и без него (2), спектр пропускания кристалла Ho:YAG (3), спектр пропускания атмосферы (4)

На этом рисунке также представлены спектр пропускания кристалла Ho:YAG и спектр пропускания атмосферы, определяемый в данном спектральном диапазоне линиями поглощения паров воды. В селективном резонаторе спектр имел центр на длине волны 1907,5 нм и ширину по полувысоте 0,25 нм. При увеличении мощности спектр сдвигался на 0,6 нм в длинноволновую область и уширялся до 0,6 нм по полувысоте. Мощность генерации при установке в резонатор ЭФП снижалась на ~7 %.

1.3. Исследования Tm:YLF лазера, работающего на π -поляризации. Лазер на основе кристалла Tm:YLF представляет интерес также вследствие того, что излучение при генерации на π -поляризации можно использовать для накачки перспективных кристаллов Ho:YLF, имеющих максимум поглощения на длине волны ~1892 нм.

На рис. 4 представлены зависимости выходной мощности Tm:YLF лазера от мощности накачки при различных коэффициентах отражения выходных зеркал с $\mathcal{R} = 300$ мм. При зеркале с $R = 90$ % и накачке более 100 Вт наблюдался загиб зависимости, по-видимому, связанный с сильной тепловой линзой, наводимой в кристалле. В случае использования зеркала с $R = 80$ % снижение эффективности генерации с ростом мощности накачки не наблюдалось.

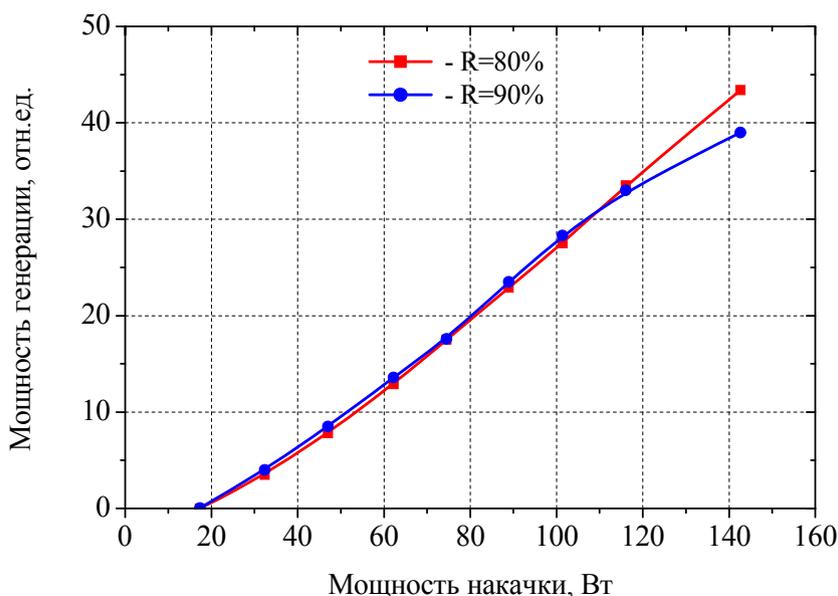


Рис. 4. Зависимости мощности π -поляризованного излучения Tm:YLF лазера от мощности накачки при разных коэффициентах отражения зеркала M_3 с $\mathcal{R} = 300$ мм

Спектральный анализ излучения Tm:YLF лазера показал, что длина волны генерации незначительно зависела от добротности резонатора и находилась в диапазоне 1887÷1890 нм. Для эффективной накачки кристалла Ho:YLF необходимо, чтобы спектр генерации Tm:YLF лазера был согласован с максимумом поглощения кристалла (~1892 нм) за счет реализации внутррезонаторной селекции. Спектры π -поляризованного излучения Tm:YLF лазера с установленным в резонатор ЭФП и без него представлены на рис. 5. На этом рисунке также представлены спектр пропускания кристалла Ho:YLF и спектр пропускания атмосферы, определяемый в данном спектральном диапазоне линиями поглощения паров воды.

В селективном резонаторе центр генерации находился на длине волны 1891 нм, а спектральная ширина по полувысоте составила 0,6 нм. При увеличении выходной мощности центр спектра генерации сместился на 0,6 нм в длинноволновую область. Внесение в резонатор спектрального фильтра снижало мощность генерации на 7 %.

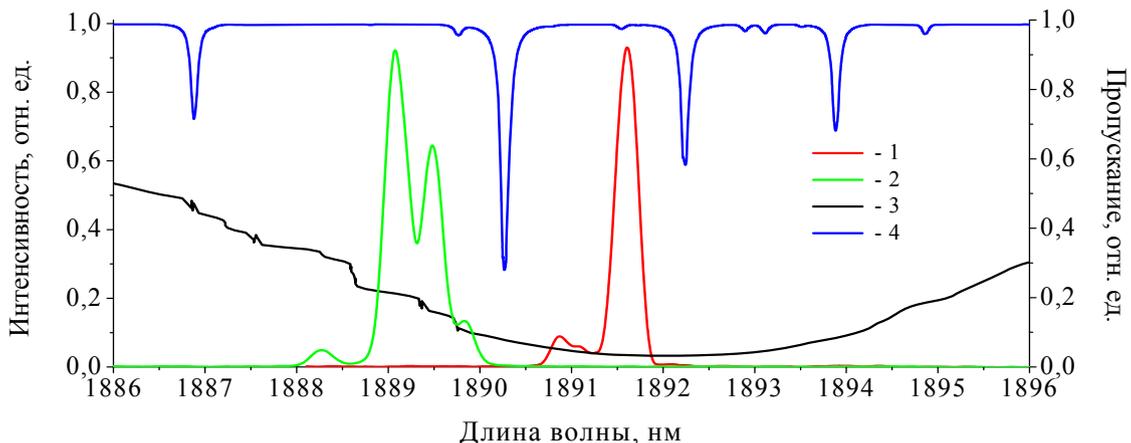


Рис. 5. Спектры π -поляризованного излучения Tm:YLF лазера с ЭФП (1) и без него (2), спектр пропускания кристалла Ho:YLF для π -поляризации (3), спектр пропускания атмосферы (4)

2. Применение Tm:YLF лазера для накачки Ho:YAG лазера

Благодаря тому, что спектр σ -поляризованного излучения Tm:YLF лазера согласован с максимумом поглощения кристалла Ho:YAG ($\sim 1907,5$ нм), возможно применение Tm:YLF лазера для накачки Ho:YAG лазера, используемого в образцах излучателей. Но Tm:YLF лазер может быть полноценной заменой волоконному тулиевому лазеру в том случае, если при его использовании эффективность преобразования накачки в Ho:YAG лазере будет высокой (не менее 50 %). В связи с этим были проведены исследования эффективности генерации Ho:YAG лазера при накачке излучением Tm:YLF лазера. Экспериментальная схема представлена на рис. 6.

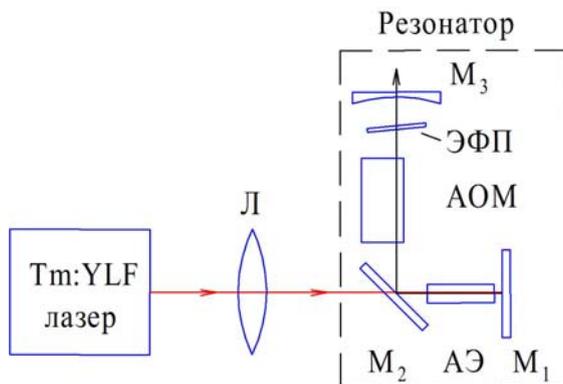


Рис. 6. Экспериментальная схема Ho:YAG лазера: Л – линза, M_1 , M_2 – дихроичные плоские зеркала; M_3 – выходное сферическое зеркало, АЭ – активный элемент, АОМ – акустооптический модулятор, ЭФП – эталон Фабри-Перо

Резонатор Ho:YAG лазера был построен по Г-образной схеме, состоящей из трех зеркал: дихроичных плоских зеркал M_1 и M_2 и выходного сферического полупрозрачного зеркала M_3 . Для обеспечения линейной поляризации излучения зеркало M_2 вносило дискриминацию по поляризации (4 % потерь за проход). Зеркала M_1 и M_2 имели высокое пропускание на длине волны накачки ~ 1908 нм и высокое отражение на длине волны генерации ~ 2100 нм. Реализовывалась односторонняя накачка для исключения влияния обратного отражения накачки на работу тулиевого лазера.

Диаметр сфокусированного в кристалл Ho:YAG пучка накачки составлял 500 мкм. Для осуществления модуляции добротности резонатора и работы лазера в импульсно-периодическом режиме в резонатор устанавливался акустооптический модулятор из кристаллического кварца. Эталон Фабри-Перо толщиной 100 мкм обеспечивал генерацию Ho:YAG лазера на одной линии с длиной волны 2097 нм.

На рис. 7 представлена зависимость мощности генерации Ho:YAG лазера от мощности накачки (Tm:YLF лазера). Из зависимости видно, что осуществляется высокоэффективная генерация Ho:YAG лазера при использовании для накачки Tm:YLF лазера: эффективность преобразования излучения накачки в излучение генерации составила 58 %, которая незначительно меньше эффективности преобразования при накачке волоконным лазером – 62÷64 %.

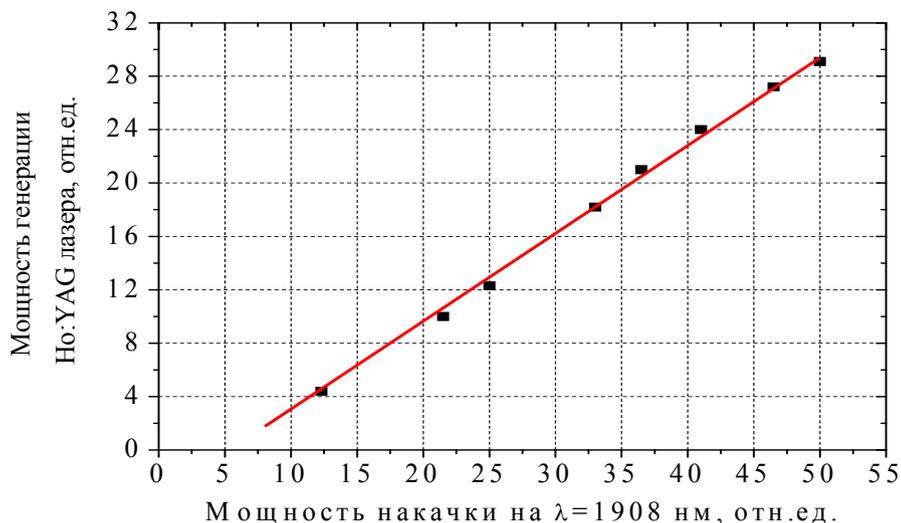


Рис. 7. Зависимость мощности генерации Ho:YAG лазера от мощности накачки (Tm:YLF лазера)

Полученные результаты показали, что Tm:YLF лазер может стать заменой волоконному тулиевому лазеру.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования Tm:YLF лазера на одном цилиндрическом АЭ. Получена высокоэффективная генерация с высоким качеством пучка. Разработанный Tm:YLF лазер состоит из комплектующих (активный элемент, диодные модули накачки и оптические элементы) отечественного производства.

Эффективность преобразования электрической мощности в лазерное излучение с учетом КПД диодной накачки в 1,5 раза выше, чем у волоконных тулиевых лазеров.

Осуществлена точная настройка спектра генерации Tm:YLF лазера на максимум поглощения кристалла Ho:YAG. Реализована высокоэффективная генерация Ho:YAG лазера с эффективностью преобразования излучения накачки 58 %.

Таким образом, параметры разработанного Tm:YLF лазера позволяют использовать его вместо волоконного тулиевого лазера, имеющего в своем составе комплектующие импортного производства, что в условиях современной внешнеполитической обстановки обеспечит экономическую и технологическую безопасность при серийном выпуске излучателей.

Список литературы

1. Lippert E., Fonnun H., and Stenersen K., Proc. of SPIE Vol. 7836, 78360D-1, (2010).

2. Eichhorn M., Kieleck C., Hildenbrand A., Schellhorn M., Stoepler G. Proc. of SPIE Vol. 8898, 8898-8, (2013).
3. Lippert E., Fonnum H., Magnus W. Naakestad. Proc. of SPIE Vol. 9251, 92510D-1, (2014).
4. Захаров Н. Г., Антипов О. Л., Савикин А. П., Шарков В. В., Еремейкин О. Н., Фролов Ю. Н., Мищенко Г. М., Великанов С. Д. Квантовая электроника, **39**, № 5, 410-414, (2009).
5. Schellhorn M. Appl. Phys. B 91, 71–74 (2008).
6. So S., Mackenzie J. I., Shepherd D. P., Clarkson W. A., Betterson J. G. and Gorton E. K., Appl. Phys. 2006. B 84, P. 389–393.
7. Schellhorn M., Ngcobo S., and Bollig C. Appl. Phys. 2009. B 94, P. 195–198.