

ные показатели получают расчетным методом весовой свертки. В противном случае, оценку (число в интервале от 0,1 до 1) выставляют в результате обсуждения.

Расчет интегрального показателя качества выполняется по формуле весовой свертки после уточнения группой экспертов весовых коэффициентов (значимости) комплексных характеристик качества.

Правила оценки соответствия нормативно-техническим документам по комплексным и интегральным показателям: если хотя бы одна единичная характеристика данного комплексного показателя имеет оценку «Не соответствует», такую же оценку получает комплексный показатель; если хотя бы один комплексный показатель имеет оценку «Не соответствует», такую же оценку получает интегральный показатель. Полученные оценки заносят в итоговую таблицу результатов оценки. По результатам выполнения данного и последующих этапов испытаний оформляется протокол с подписями всех участвовавших экспертов.

Все сотрудники должны осуществлять свою деятельность в соответствии с должностными инструкциями. Специалисты руководствуются в своей работе методикой оценки программного обеспечения, руководством по качеству, должностными инструкциями и требованиями, предъявляемыми к специалистам.

В результате проведенного анализа были получены следующие оценки факторов качества встроеного программного обеспечения:

- надежность -  $K_n^{\phi} = 0,79$ ;
- сопровождаемость  $K_c^{\phi} = 0,81$ ;
- удобство применения  $K_y^{\phi} = 0,55$ ;
- эффективность  $K_z^{\phi} = 0,9$ ;
- универсальность  $K_{ун}^{\phi} = 0,75$ ;
- корректность  $K_k^{\phi} = 0,84$ .

Все показатели принимают значения в пределах требуемой нормы в соответствии с ГОСТ 28195. Итоговая базовая оценка качества программного обеспечения 0,77, что является хорошим результатом.

УДК 621.375.826

## ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СЕНСОРНЫЕ УСТРОЙСТВА НА КРЕМНИЕВЫХ ПОДЛОЖКАХ

Горбаченя К.Н.<sup>1</sup>, Кисель В.Э.<sup>1</sup>, Ясюкевич А.С.<sup>1</sup>, Дейнека Р.В.<sup>1</sup>, Мальцев В.В.<sup>2</sup>,  
Леонюк Н.И.<sup>2</sup>, Кулешов Н.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИЦ «Оптических материалов и технологий» БНТУ, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Москва, Россия

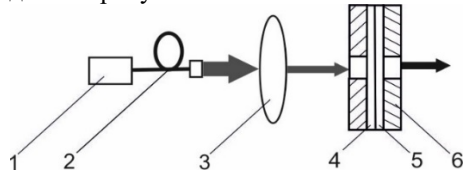
Лазерное излучение с длиной волны 1.5-1.6 мкм имеет ряд достоинств, интересных для широкого практического применения в лазерной дальнометрии, медицине и лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии благодаря целому ряду причин. Основным преимуществом указанного излучения является условная безопасность для органов зрения людей вследствие того, что малая часть излучения попадает на сетчатку, поглощаясь до нее роговицей и хрусталиком. К тому же, благодаря прозрачности атмосферы, а также высокому пропусканию излучения с длиной волны 1.5-1.6 мкм в условиях тумана, дыма и пара, лазерные источники указанного диапазона используются в системах оптической локации и дистанционного зондирования Земли.

В настоящее время существует большое количество источников лазерного излучения с длиной волны 1.5-1.6 мкм. Однако благодаря простоте и компактности конструкции, наибольший интерес разработчиков лазерных систем привлекают твердотельные лазеры на основе материалов, соактивированных ионами эрбия и иттербия. На сегодняшний день наибольшее практическое распространение среди эрбий-иттербиевых сред получили фосфатные стекла, которые характеризуются необходимыми спектроскопическими свойствами для получения эффективной лазерной генерации в области 1.5-1.6 мкм. Однако основным недостатком

использования фосфатных стекол с ионами эрбия и иттербия в качестве лазерных сред является их низкая теплопроводность (0.85 Вт/м×К) и, как следствие, низкий порог теплового разрушения в лазерах с высокой средней выходной мощностью.

Кристаллы гадолиний-алюминиевого бората, соактивированные ионами эрбия и иттербия, (Er,Yb:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>) благодаря высокой теплопроводности и соответствию требованиям для получения эффективной генерации зарекомендовали себя ранее как перспективные активные среды для лазеров с высокой средней выходной мощностью, излучающих в спектральном диапазоне 1.5-1.6 мкм. При их использовании получен непрерывный режим генерации с максимальной выходной мощностью до 1.7 Вт на длине волны 1550 нм и дифференциальной эффективностью 30%. В режиме пассивной модуляции добротности получены лазерные импульсы с энергией и частотой следования до 18 мкДж и 60 кГц, соответственно. Однако длительность лазерных импульсов в данном случае достигала 12 нс. В работе сообщается о реализации Er,Yb:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> (GdAB) микрочип лазера с пассивной модуляцией добротности, который имеет полностью «монолитную» неразъединяемую конструкцию, что обеспечивает возможность трехкратного сокращения длительности лазерных импульсов до 4 нс за счет уменьшения геометрической длины резонатора.

Схема Er,Yb:GdAB микрочип лазера, работающего в режиме пассивной модуляции добротности, приведена на рисунке 1.



1 – лазерный диод; 2 – оптоволокно; 3 – фокусирующая линза; 4 – насыщающийся поглотитель; 5 – активный элемент; 6 – медный теплоотвод

Рисунок 1 – Схема Er,Yb:GdAB микрочип лазера

В качестве источника накачки использовался лазерный диод 1 с волоконным выводом излучения 2 (диаметр волокна 105 мкм, числовая апертура 0.22), излучающий на длине волны около 980 нм с максимальной выходной мощностью до 15 Вт и параметром распространения лазерного пучка  $M^2$  равным 22. Для уменьшения термической нагрузки на активный элемент лазерный диод работал в импульсно-периодическом режиме со скважностью 2%. Излучение накачки фокусировалось внутри активного элемента в пятно диаметром 120 мкм при помощи линзы 3. «Чип» состоял из насыщающегося поглотителя кристалла магний-алюминиевой шпинели с ионами кобальта (Co:MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) 4 с начальным пропусканием 98.2% и нанесенным на входную грань покрытием HR@1550 нм + HT@980 нм и кристалла Er(1.8 ат.%),Yb(15 ат.%):GdAB 5 с нанесенным на выходную грань покрытием выходного зеркала с пропусканием 6% на длине волны генерации 1550 нм, соединенными между собой методом оптического контакта. Таким образом, геометрическая длина резонатора не превышала 2 мм, а лазер имел неразъединяемую конструкцию.

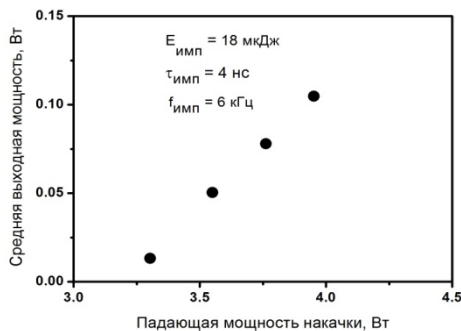


Рисунок 2 – Зависимость средней выходной мощности лазера от падающей мощности накачки

Зависимость средней выходной мощности лазера от падающей мощности накачки представлена на рисунке 2. Максимальная средняя выходная мощность лазера составила 108 мВт на длине волны генерации 1550 нм при падающей мощности накачки 4 Вт. Энергия лазерных импульсов составила 18 мкДж, длительность импульсов не превышала 4 нс. Максимальная частота следования импульсов не достигала 6 кГц при падающей мощности накачки 4 Вт и была ограничена нарушением оптического

контакта между насыщающимся поглотителем и кристаллом при падающей мощности накачки более 4 Вт. Расходимость лазерного излучения была дифракционно-ограниченной, параметр распространения лазерного пучка  $M^2$  не превышал 1.2.

Оциллограммы одиночного импульса и цуга импульсов, записанные при падающей мощности накачки около 4 Вт, представлены на рисунках 3, 4.

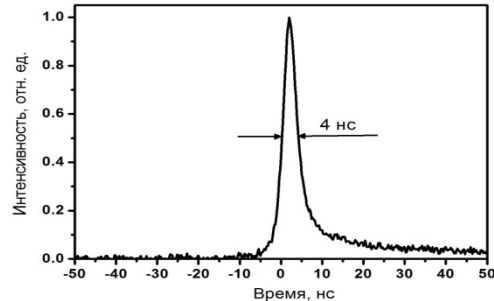


Рисунок 3 – Оциллограмма одиночного импульса длительностью 4 нс

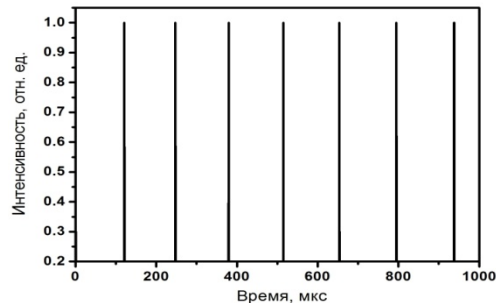


Рисунок 4 – Оциллограмма цуга импульсов с частотой следования 6 кГц

В таблице приведены выходные характеристики Er,Yb:GdAB микрочип лазера, работающего в режиме пассивной модуляции добротности.

Таблица – Выходные характеристики Er,Yb:GdAB микрочип лазера, работающего в режиме пассивной модуляции добротности

2ω, мкм	E, мкДж	f, кГц	t, нс	P <sub>ср</sub> , мВт	λ, нм
120	18	6	4	108	1550

### Литература

1. G. Karlsson, F. Laurell, J. Tellefsen, B. Denker, B. Galagan, V. Osiko, and S. Sverchkov, "Development and characterization of Yb-Er laser glass for high average power laser diode pumping," *Appl. Phys. B.* 75, 41 (2002).
2. R. Fluck, R. Haring, R. Pascotta, E. Gini, H. Meichior, U. Keller, *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 72, 3273.
3. K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk, and N.V. Kuleshov, "High efficient continuous-wave diode-pumped Er,Yb:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> laser," *Optics Letters* 38, 2446 (2013).
4. K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk, N.V. Kuleshov, "Eye-safe 1.55 μm passively Q-switched Er,Yb:GdAl<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> diode-pumped laser," *Opt. Lett.* 41, 918–921 (2016).