

Новое иттербиевое фосфатное стекло для лазеров с диодной накачкой

Б.И.Галаган, И.Н.Глушенко, Б.И.Денкер, В.Э.Кисель, С.В.Курильчик, Н.В.Кулешов, С.Е.Сверчков

Разработано новое иттербиевое лазерное стекло на алюмоборофосфатной основе. Исследования показали, что оно обладает близкими к рекордным для фосфатных стекол значениями химической стойкости и термпрочности и не уступает известным лазерным стеклам по спектрально-люминесцентным характеристикам. Синтезирована отливка стекла лазерного качества, легированного иттербием с концентрацией $5 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Из синтезированного стекла изготовлены активные лазерные элементы размерами $5 \times 5 \times 2$ мм для продольной диодной накачки. На их основе построен лазер, мощность выходного излучения которого достигла 783 мВт в непрерывном режиме, а максимальная дифференциальная эффективность составила 28.9%. В режиме пассивной синхронизации мод получены импульсы длительностью ~ 150 фс и пиковой мощностью около 5 кВт.

Ключевые слова: лазерное стекло, иттербий, фемтосекундный лазер.

Лазерные материалы, легированные ионами трехвалентного иттербия Yb^{3+} , представляют повышенный интерес с точки зрения создания на их основе компактных, надежных и эффективных источников лазерного излучения в спектральной области около 1 мкм. К преимуществам иттербийсодержащих лазерных материалов по сравнению с неодимсодержащими материалами можно отнести простую двухуровневую структуру энергетических уровней, что обуславливает отсутствие потерь на поглощение из возбужденного состояния и ап-конверсию [1], и малый ($\sim 4\% - 5\%$) квантовый дефект (разность между частотами поглощаемого и испускаемого квантов), который обеспечивает низкий уровень тепловых потерь в активной среде и, следовательно, получение более высоких выходных мощностей. Интенсивные полосы поглощения в области 980 нм позволяют использовать в качестве источников накачки коммерческие лазерные диоды, что существенно снижает стоимость и повышает надежность данного типа лазеров. Стоит также отметить, что себестоимость производства стеклянных материалов значительно ниже, чем кристаллических лазерных сред, а более широкие и гладкие полосы стимулированного испускания представляют интерес для создания источников перестраиваемого лазерного излучения и источников ультракоротких лазерных импульсов. Лазерная генерация на иттербиевых стеклах была продемонстрирована в ряде работ как при использовании для накачки твердотельных лазеров [2], так и при диодной накачке [3], однако достигнутый уровень выходной мощности составлял около 0.5 Вт.

Как известно, к наиболее существенным недостаткам фосфатных лазерных стекол относятся низкая механическая и тепловая прочность, что ограничивает среднюю мощность лазеров, а также невысокая стойкость к действию атмосферной влаги. Основным структурным компонентом фосфатных стекол являются PO_4 -тетраэдры с сильными ковалентными связями между центральным ионом и кислородными анионами. Свойства стекла в значительной мере определяются числом химических связей тетраэдров между собой. Известным примером термически и механически прочного стекла является плавленный кварц, в котором каждый из SiO_4 -тетраэдров связан с четырьмя соседними посредством мостиковых кислородных ионов, т.е. ионов, образующих связи с двумя соседними стеклообразующими ионами. Таким образом получается прочная трехмерная структура, которая и определяет превосходные термомеханические свойства плавленного кварца. В случае же фосфатных стекол PO_4 -тетраэдры связаны только с 2–3 соседними, в результате чего термомеханическая и химическая стойкость этих стекол низка.

Идея разработки высокопрочного и химически стойкого лазерного стекла на фосфатной основе, использованная нами ранее в [4], состоит в следующем. Известно, что трехвалентные ионы малого радиуса (B^{3+} , Al^{3+}) также могут образовывать прочные тетраэдрические комплексы с кислородом. В кристаллах BPO_4 и AlPO_4 чередующиеся группы PO_4 и BO_4 (или PO_4 и AlO_4 соответственно) формируют прочную трехмерную решетку, подобную структуре кварца с четырьмя мостиковыми кислородными ионами в каждом тетраэдре. Аналогично кристаллам стекла смешанного борофосфатного и алюмофосфатного состава также могут обладать повышенной термомеханической прочностью и химической стойкостью по сравнению с чисто фосфатными благодаря повышенной связанности стеклообразующих тетраэдров. Используя эти соображения и результаты работы [4], мы выбрали следующий молекулярный состав иттербиевого лазерного стекла со смешанным алюмоборо-

Б.И.Галаган, И.Н.Глушенко, Б.И.Денкер, С.Е.Сверчков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: galagan@ran.gpi.ru

В.Э.Кисель, С.В.Курильчик, Н.В.Кулешов. НИИ оптических материалов и технологий Белорусского национального технического университета, Белоруссия, 220013 Минск, просп. Независимости, 65, корп. 17

Поступила в редакцию 24 марта 2009 г.

фосфатным стеклообразователем: Li_2O (9%), Al_2O_3 (7%), V_2O_5 (12%), $\text{La}_2\text{O}_3 + \text{Yb}_2\text{O}_3$ (7%), P_2O_5 (65%). Исследования показали, что такие свойства стекла данного состава, как стойкость к атмосферной влаге, твердость, коэффициент термического расширения, стойкость к тепловым нагрузкам, аналогичны свойствам значительно более прочных и химически стойких силикатных стекол, а спектры и сечения поглощения и люминесценции ионов иттербия практически не отличаются от таковых для чисто фосфатных стекол. Физико-химические свойства высокопрочного алюмоборофосфатного лазерного стекла приведены ниже.

Показатель преломления n	1.53
Коэффициент теплового расширения	
при $T = 20 - 40^\circ\text{C}$ (10^{-7}K^{-1})	72
dn/dT при $T = 20 - 40^\circ\text{C}$ (10^{-7}K^{-1})	27
Термооптическая постоянная $W = dn/dT + \alpha(n - 1)$ (10^{-7}K^{-1})	66
Плотность при 20°C ($\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$)	2.83
Плотность расплава при 1350°C ($\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$)	2.67
Теплопроводность ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$)	0.83 ± 0.04
Теплоемкость ($\text{Дж}\cdot\text{см}^{-3}\cdot\text{К}^{-1}$)	2.06 ± 0.05
Твердость по Кнупу ($\text{кгс}\cdot\text{мм}^{-2}$)	702 ± 30
Потеря массы в кипящей воде ($10^{-5} \text{г}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$)	менее 1
Группа кислотоустойчивости (ГОСТ 13917-82)	1
Группа устойчивости к влажной атмосфере (ГОСТ 13917-82)	У
Температура деформации ($^\circ\text{C}$)	755
Стойкость к тепловому удару ($^\circ\text{C}$)	
без упрочнения ионным обменом	165–175
с упрочнением ионным обменом	285–315

Спектрально-люминесцентные исследования показали, что в разработанном стекле сильно выражено тушение люминесценции иттербия OH^- -группами, неизбежно присутствующими в стеклах на фосфатной основе. На рис.1 приведена зависимость скорости затухания люминесценции иттербия W_{OH^-} от содержания OH^- -групп при технологически максимально возможной концентрации $\text{Yb} 1.7 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$, соответствующей 100%-ному замещению ионов лантана ионами иттербия. Выявленное аномально сильное тушение накладывает определенные ограничения на концентрацию иттербия в стекле при использовании его в качестве активного материала лазеров. Экспериментально установлено, что при технологически достижимом в наших условиях уровне обезвожи-

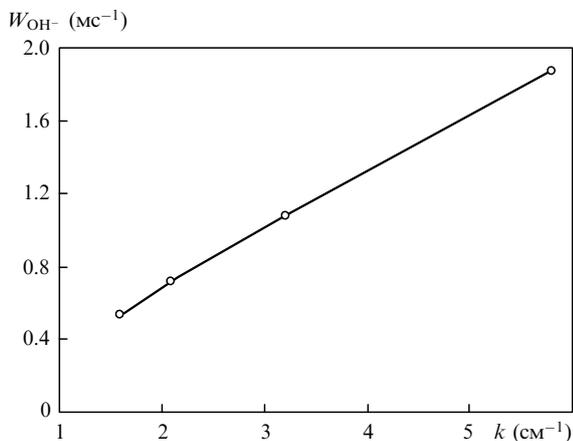


Рис.1. Зависимость скорости W_{OH^-} тушения люминесценции иттербия на гидроксильных группах от коэффициента поглощения k на длине волны 3.33 мкм; k пропорционален концентрации OH^- -групп.

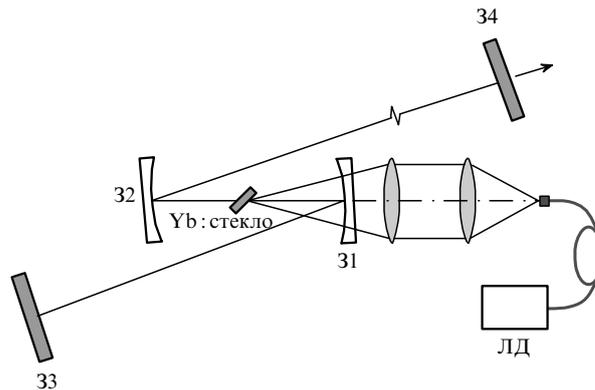


Рис.2. Схема резонатора лазера на иттербиевом стекле для получения непрерывной генерации: 31 – сферическое зеркало ($r = 100 \text{ мм}$, просветление в диапазоне 800–900 нм); 32 – сферическое зеркало ($r = 100 \text{ мм}$, $R = 99.9\%$ на $\lambda = 1050 \text{ нм}$); 33 – зеркало ($R = 99.9\%$ на $\lambda = 1050 \text{ нм}$); 34 – выходное зеркало ($T = 1.5\%, 4\%, 5.7\%$ на $\lambda = 1050 \text{ нм}$); ЛД – лазерный диод ($P_{\text{ld}} = 6 \text{ Вт}$, $\lambda_{\text{ld}} = 980 \text{ нм}$).

вания, соответствующем коэффициенту поглощения $\sim 1.5 - 2 \text{ см}^{-1}$ на длине волны 3.3 мкм, концентрация иттербия не должна превышать $(5 - 7) \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$. В таких условиях время жизни Yb^{3+} в возбужденном состоянии приближается к радиационному (1.2 мс), а скорость затухания W_{OH^-} не превышает 0.2 мс^{-1} .

Была разработана оригинальная технология отливки стекла высокого оптического качества с концентрацией иттербия $5 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$, из которого изготавливались лазерные элементы в виде плоскопараллельных пластин размером $5 \times 5 \times 2 \text{ мм}$ для продольной диодной накачки.

Эксперименты по получению непрерывной лазерной генерации проводились в резонаторе, схема которого представлена на рис.2. Входное зеркало 31 имело диэлектрическое покрытие, обеспечивающее пропускание излучения более 98% на длине волны накачки около 980 нм и высокое ($R > 99.9\%$) отражение на длине волны генерации 1020–1100 нм. Зеркала 32 и 33 также имели высокий коэффициент отражения излучения на длине волны генерации. В качестве выходных использовались плоскопараллельные зеркала 34 с коэффициентами пропускания $T = 1.5\%, 4\%$ и 5.7% на длине волны генерации. Диаметр перетяжки пучка накачки в активном элементе составлял около 80 мкм (по уровню $1/e^2$). Наилучшие выходные параметры лазера были получены при диаметре перетяжки излучения в резонаторе около 60 мкм.

Зависимости мощности непрерывного лазерного излучения от поглощенной мощности накачки для выходных зеркал с различным пропусканием представлены на рис.3. Достигнутые в экспериментах выходные характеристики лазера приведены в табл.1. Максимальная мощность лазерного излучения была получена для выходного зеркала с коэффициентом пропускания 4% и составила 783 мВт. Дифференциальная эффективность в лазерных экспериментах достигала 28.9%. Спектр лазерного излучения, снятый при $T_{\text{opt}} = 4\%$ и представленный на рис.4, имеет несколько пиков в диапазоне 1054–1057 нм с максимумом на длине волны $\lambda = 1055 \text{ нм}$.

Для перестройки длины волны генерации в плечо резонатора между зеркалами 32 и 34 вставлялась призма из стекла ТФ8. Перестроечная кривая, приведенная на рис.5, была измерена для выходного зеркала с пропусканием $T = 1.5\%$. Возможность перестройки длины волны лазе-

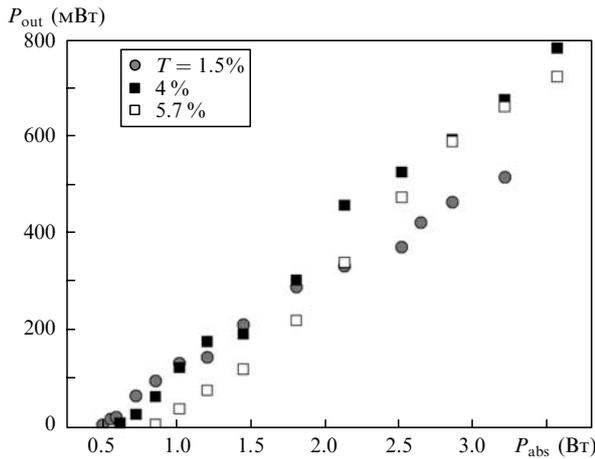


Рис.3. Выходные характеристики лазера для различных коэффициентов пропускания выходного зеркала.

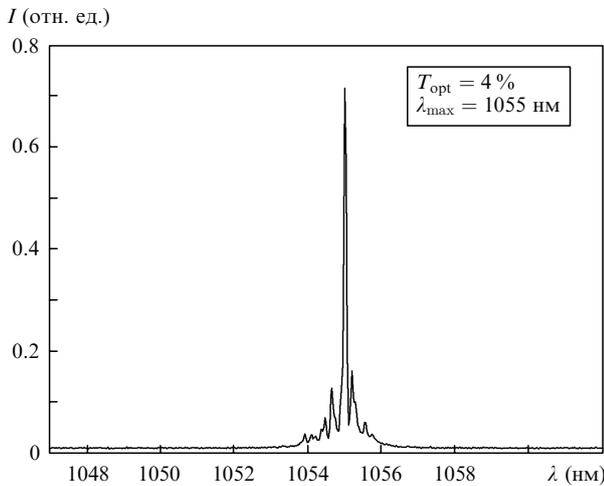


Рис.4. Спектр генерации лазера в непрерывном режиме.

ра в диапазоне 1008 – 1080 нм свидетельствует о перспективности использования данной активной среды для получения генерации ультракоротких импульсов.

При исследовании режима пассивной синхронизации мод (ПСМ) глухое зеркало резонатора 33 было заменено пассивным затвором SESAM (глубина модуляции 0.8 %, плотность энергии насыщения 30 мкДж/см²). Для получения отрицательной дисперсии групповых скоростей в резонаторе использовалась пара призм из стекла ТФ8, помещенных в плечо резонатора между зеркалами 32 и 34. Величина отрицательной дисперсии варьировалась при изменении расстояния между призмами.

Режим синхронизации мод был получен при диаметре перетяжки ТЕМ₀₀-моды резонатора на затворе около 180 мкм и расстоянии между призмами 39 см. Спектр излу-

Табл.1. Выходные параметры лазера, работающего в непрерывном режиме.

$T(\%)$	P_{th} (мВт)	η (%)	P_{out} (мВт)	λ (нм)
1.5	471	18.6	518	1056.5
4.0	633	28.9	783	1055
5.7	805.7	28.3	725	1034

Примечание: P_{th} – пороговая мощность накачки; η – дифференциальная эффективность; P_{out} – максимальная выходная мощность; λ – длина волны излучения.

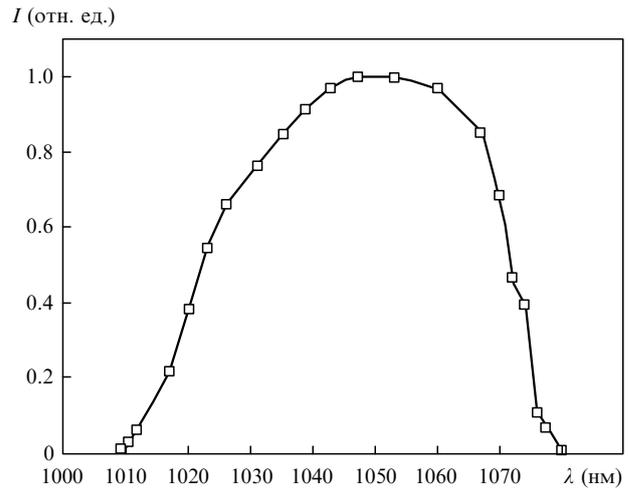


Рис.5. Перестроенная кривая генерации иттербиевого лазера.

чения и автокорреляционная функция импульсов лазера в режиме ПСМ представлены на рис.6.

Произведение длительности импульсов (около 150 фс) на их спектральную полуширину (7.8 нм), т. е. $\tau_{pulse} \times \Delta\nu_{gen}$, составило 0.317, что свидетельствует о близости формы выходных импульсов к форме спектрально-ограниченных (sech²), для которых данное произведение равно 0.315 [5]. Максимальная средняя выходная мощность лазера в режиме ПСМ составила 100 мВт при частоте следования импульсов 117 МГц, что соответствует пиковой импульсной мощности 5 кВт. Параметр качества выходного излучения M^2 был менее 1.2.

Последующее повышение мощности накачки приводило к дестабилизации режима ПСМ, что проявлялось в

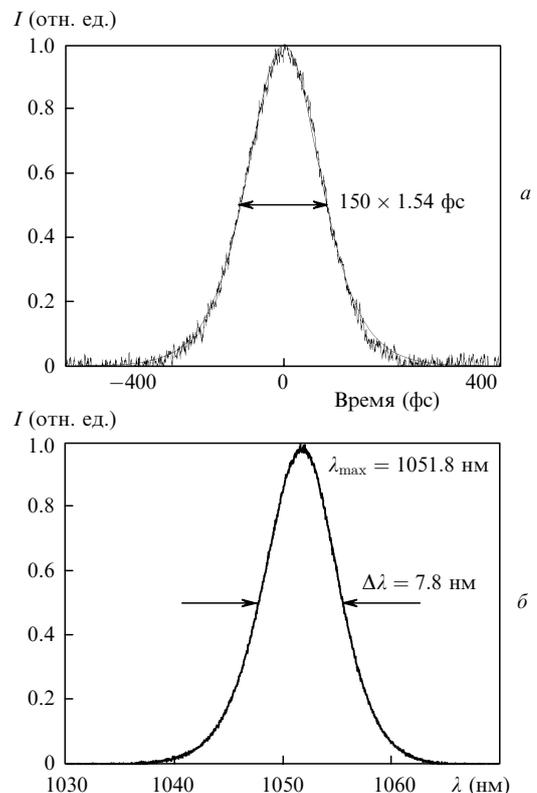


Рис.6. Автокорреляционная функция (а) и спектр (б) выходных лазерных импульсов излучения лазера на основе иттербиевого стекла в режиме ПСМ.

генерации нескольких поперечных мод. Это обстоятельство обусловлено неоптимальным согласованием пучка накачки и ТЕМ₀₀-моды резонатора в активном элементе. Дальнейшее увеличение выходной мощности генерации может быть получено при использовании для накачки лазерного диода с более высоким качеством выходного излучения, а также при повышении эффективности теплоотвода.

Таким образом, разработано иттербиевое лазерное стекло на алюмоборофосфатной основе, обладающее близкими к рекордным для фосфатных стекол значениями химической стойкости и термостойкости и не уступающее известным лазерным стеклам по спектрально-люминесцентным характеристикам. Из синтезированного стекла изготовлены активные лазерные элементы размерами 5 × 5 × 2 мм для продольной диодной накачки, и получена лазерная генерация в непрерывном режиме работы и в режиме пассивной синхронизации мод. Мощность непрерывного лазерного излучения достигла

783 мВт на длине волны 1054 нм, а максимальная дифференциальная эффективность составила 28,9 %. В режиме пассивной синхронизации мод были получены импульсы длительностью около 150 фс с пиковой мощностью 5 кВт.

Работа поддержана совместным грантом РФФИ и БРФФИ № 08-02-90006-Бел_а.

1. DeLoach L.D., Payne S.A., Chase L.L., Smith L.K., Kway W.L., Krupke W.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **29**, 1179 (1993).
2. Koch R., Clarkson W.A., Hanna D.C., Jiang S., Myers M.J., Rhonehouse D., Hamlin S.J., Griebner U., Schonnagel H. *Opt. Commun.*, **134**, 175 (1997).
3. Honninger C., Morier-Genoud F., Moser M., Keller U., Brovelli L.R., Harder C. *Opt. Lett.*, **23**, 126 (1998).
4. Karlsson G., Laurell F., Tellefsen J., Denker B., Galagan B., Osiko V., Sverchkov S. *Appl. Phys. B*, **75**, 1 (2002).
5. Koechner W. *Solid-State Laser Engineering* (New York: Springer, 1999).