

Фторидные планарные волноводы для усилителей и лазеров

Т.Е.Гришуткина, М.Е.Дорошенко, А.Я.Карасик, В.А.Конюшкин, Д.В.Конюшкин,
А.Н.Накладов, В.В.Осико, В.Б.Цветков

Созданы оптические планарные волноводы с сердцевиной из смешанных кристаллов иттриофлюорита $\text{CaF}_2\text{-YF}_3\text{-NdF}_3$ и двойной отражающей оболочкой для повышения эффективности возбуждения волновода. При диодной лазерной накачке волноводов получена генерация излучения на длине волны 1064 нм с дифференциальным КПД около 15%.

Ключевые слова: смешанные фторидные кристаллы, планарные оптические волноводы с двойной отражающей оболочкой, лазерная генерация.

1. Введение

Оптические пассивные и активные планарные волноводы (ПВ) находят применение в разных областях оптики и квантовой электроники. Волноводная теория ПВ развивалась в 80-е гг., и тогда же были предложены основные типы планарных структур, позднее реализованные на практике [1]. Среди прочих особый интерес представляют ПВ на основе кристаллов, активированных трехвалентными редкоземельными ионами, которые могут усиливать оптическое излучение в широкой видимой и ИК областях спектра. К ним, в первую очередь, можно отнести популярные оксидные лазерные кристаллы [2–5], достоинства которых хорошо известны. Менее популярные фторидные кристаллы в силу ряда замечательных качеств имеют в настоящее время все более широкий спектр применений.

Лазерные материалы на основе фторидов обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с оксидными материалами, особенно при создании широкодиапазонных усилителей. Фторидные лазерные материалы характеризуются широким спектральным окном прозрачности – от УФ до ИК области спектра (0.16–11 мкм), и могут быть активированы редкоземельными ионами до высокой их концентрации (до 10^{21} см⁻³) без существенного тушения люминесценции. Фториды имеют более узкий, по сравнению с оксидами, фоновый спектр, что существенно снижает вероятность процессов многофоновонной безызлучательной релаксации и, в частности, позволяет получать лазерную генерацию в УФ, видимом, ближнем и среднем ИК диапазонах длин волн с высокой эффективностью. Эти материалы характеризуются меньшими линейным и нелинейным показателями преломления, что снижает вероятность различных нелинейных процессов при высоких интенсивностях распространяющегося излучения. Фториды позволяют варьировать спек-

троскопические свойства редкоземельных ионов за счет изменения их локального окружения в различных твердых растворах. Большие, чем у оксидных кристаллов, времена жизни уровней редкоземельных ионов в кристаллах фторидов позволяют накапливать большую инверсию населенностей, что упрощает разработку лазерных усилителей благодаря использованию источников оптической накачки с большей длительностью импульса.

Кроме того, интерес к лазерным материалам на основе фторидов усиливается по мере развития технологии получения высококачественных нанокерамик. Создание фторидных нанокерамик дает дополнительные преимущества по сравнению с аналогичными монокристаллами того же состава за счет более высоких механической прочности и вязкости разрушения. Технология синтеза нанокерамик на основе процесса консолидации порошков или глубокой пластической деформации кристаллов позволяет получать нанокерамику лазерного оптического качества [6, 7].

В работе [8] мы сообщали о создании методом глубокой пластической деформации керамических и кристаллических слабонаправляющих оптических ПВ с разностью показателей преломления сердцевины и отражающей оболочки до 10^{-4} . Для операций в спектральной области 0.2–5 мкм были созданы волноводы с одной и несколькими сердцевинами на основе фторидных керамик и кристаллов CaF_2 , SrF_2 , BaF_2 и их твердых растворов, активированных трехвалентными ионами Nd, а также кристаллов LiF с центрами окраски. Были представлены первые результаты генерационных исследований при диодной лазерной накачке керамических $\text{SrF}_2\text{:NdF}_3$ -волноводов.

Один из недостатков созданных слабонаправляющих ПВ – невысокая эффективность возбуждения мод сердцевины ПВ некогерентным излучением лазерного диода, в частности сопряженного с отрезком многомодового световода. Соответственно КПД генерации в [8] оказался невысоким (4%). Для увеличения эффективности возбуждения волоконных световодов в [9] была предложена и продемонстрирована структура волновода, имеющего двойную отражающую оболочку. Та же идея была использована позднее при создании ПВ [5].

Целью настоящей работы являлось создание ПВ с двойной отражающей оболочкой для повышения эффек-

Т.Е.Гришуткина, М.Е.Дорошенко, А.Я.Карасик, В.А.Конюшкин, Д.В.Конюшкин, А.Н.Накладов, В.В.Осико, В.Б.Цветков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: dorosh@lst.gpi.ru

Поступила в редакцию 19 августа 2014 г., после доработки – 19 июня 2015 г.

тивности возбуждения волновода с сердцевиной на основе активированных трехвалентными редкоземельными ионами Nd кристаллов фторидов и с заданной длиной волны излучения лазерной генерации. Представлялось важным сравнить при одинаковых условиях эффективность задающих лазеров на основе двухслойного и трехслойного волноводов с двойной отражающей оболочкой при диодной лазерной накачке ПВ.

2. ПВ с двойной отражающей оболочкой

В качестве активной среды лазера на основе ПВ были выбраны смешанные кристаллы иттрофлюорита $\text{CaF}_2\text{-YF}_3(12 \text{ вес.}\%)\text{-NdF}_3(1 \text{ вес.}\%)$. Ранее исследовались генерационные [10] и спектроскопические характеристики кристаллов такого состава [11–14]. Разупорядоченные кристаллы иттрофлюорита имеют широкие неоднородно уширенные спектры поглощения и люминесценции, подобные таковым для неодимовых лазерных стекол (спектр люминесценции Nd^{3+} на переходе ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$ приведен на рис.1). Это делает данные кристаллы перспективными при создании перестраиваемых по частоте лазерных усилителей, в том числе усилителей коротких импульсов. Предполагается, что излучение задающего лазера на основе ПВ с сердцевиной из кристалла иттрофлюорита может быть усилено в лазерном усилителе, на роль которого хорошо подходит усилитель на стекле. Например, фосфатное стекло имеет спектр усиления шириной более 150 см^{-1} с максимумом усиления на длинах волн $\lambda \sim 1050\text{--}1053 \text{ нм}$ [15]. Спектральное положение полос и максимумы интенсивности в спектрах люминесценции иттрофлюорита и фосфатного стекла хорошо совпадают, что позволяет рассчитывать на эффективное усиление излучения.

При создании ПВ методом глубокой деформации [8] мы использовали сердцевину и отражающую оболочку из кристаллов или нанокерамик одного состава – CaF_2 или SrF_2 . Для создания разности показателей преломления $n_1 - n_2$ сердцевины (n_1) и отражающей оболочки (n_2) сердцевина ПВ активировалась примесью NdF_3 ($\sim 0.5 \text{ мол.}\%$). Материалы сердцевины и отражающей оболочки имели близкие показатели преломления ($n_1 - n_2 \sim 10^{-3}\text{--}10^{-4}$) и соответственно близкие коэффициенты термического расширения (КТР), что при спекании пластин сердцевины и оболочки позволяло получать однородную структуру волновода. Иная ситуация возникает при создании трехслойных ПВ из материалов с различными КТР.

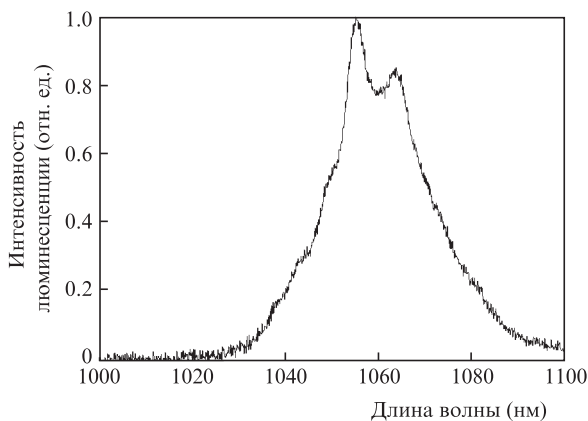


Рис.1. Спектр люминесценции Nd^{3+} на переходе ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ в кристалле иттрофлюорита $\text{CaF}_2\text{-YF}_3(12 \text{ вес.}\%)\text{-NdF}_3(1 \text{ вес.}\%)$.

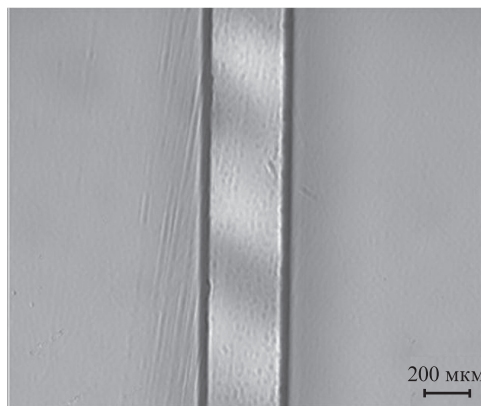


Рис.2. Полученное с помощью микроскопа изображение грани структуры волновода: сердцевина – пластина $\text{CaF}_2\text{-YF}_3(12 \text{ вес.}\%)\text{-NdF}_3(1 \text{ вес.}\%)$, первая отражающая оболочка – слой полимера, вторая отражающая оболочка – кристаллическая пластина из LiF.

При создании ПВ с двойной отражающей оболочкой высокая эффективность возбуждения световедущей сердцевины будет определяться по возможности большой разностью показателей преломления сердцевины и второй внешней отражающей оболочки $n_1 - n_3$ или соответственно большой числовой апертурой волновода $\text{NA} = (n_1^2 - n_3^2)^{1/2}$. В таком трехслойном волноводе разность показателей преломления сердцевины и первой отражающей оболочки $n_1 - n_2$, как и в двухслойном волноводе, задает число направляемых сердцевиной мод.

Итак, сердцевиной ПВ в нашем волноводе служат полированные пластины из кристалла иттрофлюорита $\text{CaF}_2\text{-YF}_3(12 \text{ вес.}\%)\text{-NdF}_3(1 \text{ вес.}\%)$ с длиной 15–20 мм и толщиной 0.2–1.4 мм ($n_1 = 1.4343$). Для второй отражающей оболочки были выбраны полированные кристаллы LiF толщиной 10 мм с показателем преломления $n_3 = 1.391$ ($\lambda = 633 \text{ нм}$). В качестве первой отражающей оболочки использовался тонкий слой полимерного материала толщиной 3–6 мкм (рис.2). Показатель преломления этого слоя $n_2 < n_1$ определялся из измеренного значения числовой апертуры $\text{NA} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = 0.05$ при возбуждении ПВ излучением с $\lambda = 633 \text{ нм}$ гелий-неонового лазера [8]. Полученная разность показателей преломления $n_1 - n_2$ составила 8.8×10^{-4} .

В результате в созданном ПВ добавление второй отражающей оболочки при значительном увеличении полной числовой апертуры волновода $\text{NA} = (n_1^2 - n_3^2)^{1/2}$ должно привести к существенному увеличению эффективности возбуждения мод сердцевины посредством перекрытия полей возбужденных мод второй оболочки и мод сердцевины. Измеренная числовая апертура двухслойного волновода $\text{NA} = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \approx 0.05$, числовая апертура трехслойного волновода $\text{NA} = (n_1^2 - n_3^2)^{1/2} \approx 0.16$. Грубая оценка увеличения эффективности возбуждения мод сердцевины при переходе от двухслойного к трехслойному многомодовому ПВ пропорциональна отношению квадратов этих двух числовых апертур и дает величину ~ 10 .

3. Генерационные исследования

Для исследования генерационных характеристик нами была выбрана оптическая схема, использованная в работе [8]. Описанный выше ПВ на основе кристалла иттрофлюорита помещался в резонатор длиной $\sim 35 \text{ мм}$, состоящий из плоского дихроичного зеркала и выходного во-

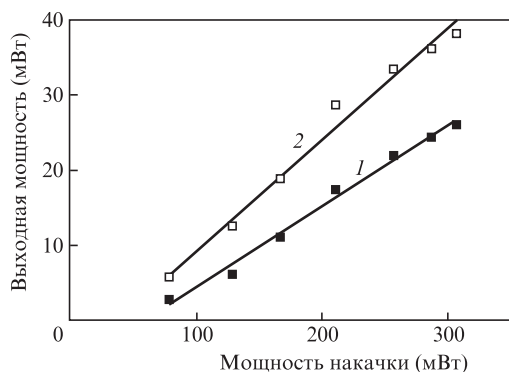


Рис.3. Зависимости выходной мощности генерации от мощности падающего излучения накачки для кристалла (1) и ПВ с сердцевинной из иттрофлюорита, активированного ионами неодима (2).

гнутого зеркала с радиусом кривизны 50 мм. У выходного зеркала коэффициент отражения на длине волны генерации составлял 95%, входное дихроичное зеркало имело близкое к 100% отражение на длине волны генерации и большое пропускание на длине волны накачки $\lambda = 795$ нм. В качестве лазера накачки использовался лазерный диод с волоконным выводом излучения и диаметром сердцевинной 120 мкм. Импульсное излучение лазерного диода с $\lambda = 795$ нм, длительностью импульсов 3 мс и частотой их следования 10 Гц после волокна фокусировалось сферической линзой ($f = 8-12$ мм) в сердцевину ПВ через дихроичное плоское зеркало.

Данный лазер на основе трехслойного ПВ длиной 15 мм с сердцевинной толщиной 1.4 мм генерировал излучение на $\lambda = 1064$ нм. На рис.3 приведены зависимости выходной мощности генерации от мощности падающего излучения накачки. Реальная мощность накачки, поглощенная в сердцевине ПВ, существенно меньше мощности падающего излучения из-за волноводных потерь и несогласованности фокусирующей системы лазера накачки с числовой апертурой ПВ. Измеренный дифференциальный КПД данного лазера ($\sim 15\%$) значительно больше КПД (4%), полученного нами в такой же оптической схеме при той же накачке для лазера с двухслойным ПВ, имеющим сердцевину из керамики $\text{SrF}_2:\text{NdF}_3$ (0.5 мол.%) с толщиной 0.2 мм и шириной 7 мм и отражающую оболочку из кристалла SrF_2 . Достигнутый в настоящей работе КПД близок к значению, полученному в лазере с оптимизированным кристаллом $\text{SrF}_2:\text{Nd}^{3+}$, для которого максимальный дифференциальный КПД по поглощенной мощности был равен 24%. Следует также отметить, что дифференциальный КПД генерации по мощности падающего излучения для монокристалла иттрофлюорита в аналогичной схеме был даже меньше, чем для лазера с ПВ и составил 11% (рис.3).

На рис.4 приведены измеренные спектры генерации лазера с активным элементом на основе монокристалла или ПВ из иттрофлюорита. Видно, что спектры генерации монокристалла и ПВ имеют максимум на $\lambda = 1064$ нм, что позволяет эффективно использовать это излучение для последующего усиления, например, в усилителях на основе силикатного стекла или кристаллов иттрий-алюминиевого граната. В спектрах генерации наблюдается периодическая структура. Отметим, что при уменьшении толщины сердцевинной ПВ от 1.2 мм до 220 мкм происходило существенное сужение спектра генерации (рис.4,б) при сохранении периодической структуры. Данное об-

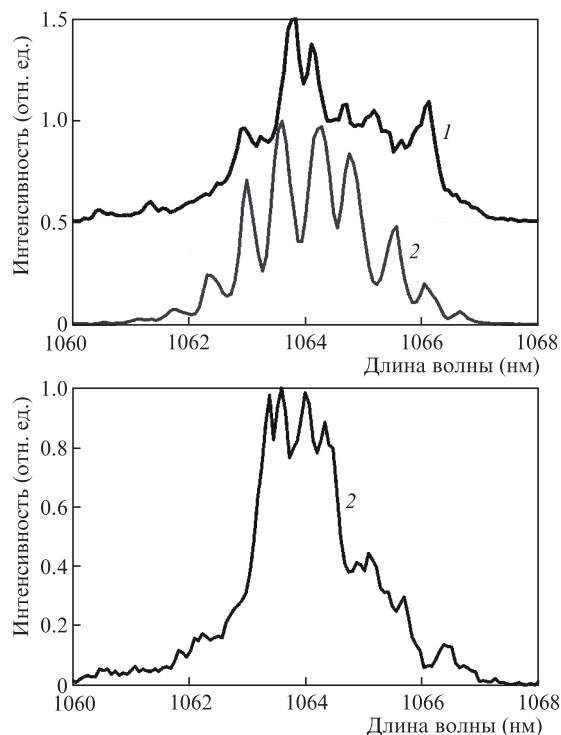


Рис.4. Спектры генерации для монокристалла (1) и ПВ с сердцевинной из иттрофлюорита с неодимом (2) толщиной 1.2 мм (а) и 200 мкм (б).

стоятельство может быть связано с различным числом генерируемых мод и межмодовым расстоянием в ПВ в зависимости от толщины их сердцевинной.

Таким образом, созданы трехслойные ПВ с сердцевинной из кристаллов CaF_2-YF_3 (12 вес.%)– NdF_3 (1 вес.%) и двойной отражающей оболочкой. При диодной лазерной накачке ПВ получена генерация излучения на $\lambda = 1064$ нм с дифференциальным КПД около 15%.

Авторы благодарят Д.Х.Нурлигареева и М.В.Фадина за проведение измерений показателей преломления кристаллов.

Исследования генерационных свойств ПВ с сердцевинной на основе смешанного фторида CaF_2-YF_3 (12 вес.%)– NdF_3 (1 вес.%) были выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда №14-22-00248.

1. Унгер Х.-Г. *Планарные и волоконные оптические волноводы* (М.: Мир, 1980).
2. Griebner U., Grunewald R., Schonagel H. *Opt. Commun.*, **164**, 185 (1999).
3. Bonner C., Hanna C. *Opt. Lett.*, **33**, 942 (1998).
4. Romanyuk Y.E., Borca C.N., et al. *Opt. Lett.*, **26**, 881 (2001).
5. Beach R.J., Mitchell S.C., et al. *Opt. Lett.*, **26**, 881 (2001).
6. Basiev T.T., Doroshenko M.E., Konyushkin V.A., Osiko V.V. *Opt. Lett.*, **35**, 4009 (2010).
7. Alimov O.K., Basiev T.T., et al. *Opt. Mater.*, **34**, 799 (2012).
8. Конюшкин В.А., Накладов А.Н., Конюшкин Д.В., Дорошенко М.Е. и др. *Квантовая электроника*, **43**, 60 (2013).
9. Грудинин А.Б., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. и др. *Квантовая электроника*, **8**, 2383 (1981).
10. Каминский А.А. *Лазерные кристаллы* (М.: Наука, 1975).
11. Дианов Е.М., Карасик А.Я., Щербаков И.А. *Квантовая электроника*, **4**, 1050 (1977).
12. Басиев Т.Т., Воронько Ю.К., Карасик А.Я., Осико В.В., Щербаков И.А. *ЖЭТФ*, **75** (1), 66 (1978).
13. Ver Steeg K.W., Reeves R.J., et al. *Phys. Rev. B*, **51** (9), 6085 (1995).
14. Beck W., Karasik A.Ya., et al. *J. Lumin.*, **86**, 289 (2000).
15. Voronko Yu.K., Denker B.I., et al. *Opt. Commun.*, **18**, 88 (1976).