

## Планарные волноводные структуры на основе $\text{SrF}_2$ : Ho, Er, Tm. Зависимость показателя преломления от концентрации ионов активатора

А.Я.Карасик, В.А.Конюшкин, А.Н.Накладов, Д.С.Чунаев

*Измерены показатели преломления кристаллов  $\text{SrF}_2$  с примесями ионов гольмия, эрбия и тулия. Эти кристаллы используются в качестве активных лазерных сред, в частности они могут применяться как материалы для создания планарных волноводных структур. Наличие активных ионов может создавать разность показателей преломления между оболочкой и активированной сердцевинной планарного волновода. При концентрациях примеси до 4% разность показателей преломления  $\Delta n$  активированной сердцевины и неактивированного отражающего слоя может достигать 0.007.*

**Ключевые слова:** фторид стронция, показатели преломления.

Интерес к использованию планарных оптических волноводов (ПВ) в качестве активной лазерной среды обусловлен рядом их достоинств по сравнению с объемными средами. В работах [1, 2] сообщалось о разработке методов создания пластинчатых керамических и кристаллических планарных волноводов на основе кристаллов и керамик фторидов щелочных и щелочноземельных элементов, активированных трехвалентными ионами редкоземельных (РЗ) элементов. Целью настоящей работы является исследование материалов, активированных РЗ ионами, для создания активных планарных волноводов и для получения лазерного усиления в ближнем ИК диапазоне спектра.

В работе [1] для создания пластинчатых волноводов применялся метод горячего прессования. При изготовлении планарного волновода пластина сердцевины волновода из фторидной керамики или кристалла, предварительно отполированная с двух сторон, соединялась с двумя отполированными пластинами отражающих слоев. Эта трехслойная структура подвергалась горячему одноосному формованию. Такой способ создания пластинчатого волновода имеет определенные особенности. Использование в качестве материалов активной сердцевины и отражающей оболочки кристаллов с существенно различными коэффициентами термического расширения (КТР) при остывании структуры может привести к дополнительным напряжениям на границе двух сред, составляющих волновод, после процесса горячего формования.

Поэтому в данном случае предпочтительнее использовать в качестве материалов сердцевины и оболочки кристаллы с одной кристаллической структурой, имеющие близкие значения КТР. Разность показателей преломления сердцевины и оболочки можно обеспечить путем введения различных примесей как в сердцевину, так и в отражающую оболочку волновода, предполагая, что малые концентрации активатора не повлекут значитель-

ное изменение КТР. Этот подход, кроме того, обеспечивает возможность плавного изменения разности показателей преломления сердцевины и оболочки. Особый интерес имеет изменение показателя преломления прозрачных кристаллов при введении примесей РЗ элементов, которые к тому же должны играть одновременно роль лазерных активаторов.

В работе [2] для увеличения эффективности возбуждения ПВ была предложена и продемонстрирована трехслойная структура волновода, имеющего двойную отражающую оболочку с сердцевиной на основе кристаллов фторидов, активированных трехвалентными редкоземельными ионами Nd. Первая отражающая оболочка представляла собой слой полимера толщиной 3–6 мкм, вторая отражающая оболочка состояла из кристаллической пластины LiF толщиной в сотни микрометров. Заметим, что создание первой полимерной отражающей оболочки в подобных трехслойных ПВ упрощает проблему возникновения напряжений в интерфейсных слоях. В результате в созданном ПВ добавление второй отражающей оболочки при значительном увеличении полной числовой апертуры возбуждения волновода приводило к существенному увеличению эффективности возбуждения мод сердцевины благодаря перекрытию полей возбужденных мод второй оболочки и мод сердцевины. По оценке, увеличение эффективности возбуждения мод сердцевины при переходе от двухслойного к трехслойному многомодовому ПВ пропорционально отношению квадратов этих двух числовых апертур.

Результаты генерационных исследований активных ПВ первого типа, созданных методом горячего прессования на основе керамики  $\text{SrF}_2$  с активированной неодимом сердцевиной, приведены в работе [1].

В работе [3] исследовалось изменение показателя преломления кристаллов  $\text{SrF}_2$  при введении различных концентраций примесей фторидов РЗ элементов. Фактически это кристаллы двухкомпонентных твердых растворов  $(1-x)\text{SrF}_2 + x\text{RF}_3$ , где R – редкоземельный элемент. Однокомпонентный кристалл  $\text{SrF}_2$  имеет структуру, подобную структуре флюорита  $\text{CaF}_2$ , твердые растворы  $(1-x)\text{SrF}_2 + x\text{RF}_3$  при  $x < 0.5$  тоже имеют структуру флюорита. Показатель преломления кристалла  $\text{SrF}_2$  на дли-

А.Я.Карасик, В.А.Конюшкин, А.Н.Накладов, Д.С.Чунаев. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: karasik@lst.gpi.ru, chunaev@lst.gpi.ru

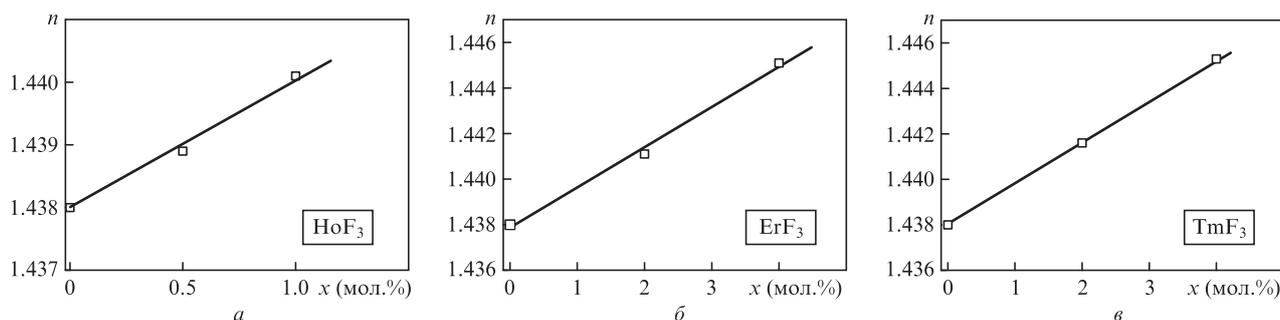


Рис.1. Зависимость показателя преломления кристаллов (1-x) SrF<sub>2</sub> + xRF<sub>3</sub> от концентрации HoF<sub>3</sub> (а), ErF<sub>3</sub> (б) и TmF<sub>3</sub> (в).

не волны  $\lambda = 589$  нм (желтая D-линия Фраунгофера)  $n = 1.438$  [3], а кристаллы RF<sub>3</sub> имеют значительно больший показатель преломления  $n \approx 1.60$ . Таким образом, введение в кристалл SrF<sub>2</sub> в качестве второго компонента фторида P3 приводит к увеличению показателя преломления.

В работе [3] исследовалось изменение показателя преломления кристалла SrF<sub>2</sub> при добавлении значительных (свыше 10 мол.%) количеств фторидов P3 элементов. Такие концентрации второго компонента приводят к значительному изменению показателя преломления –  $\Delta n \sim 0.02$ . В настоящей работе мы измерили изменения показателя преломления фторида стронция, содержащего небольшие концентрации P3 элементов, которые обычно используются для лазерных активных сред. Эти измерения проводились при помощи рефрактометра УРЛ-2, который позволяет определять показатель преломления жидкостей и твердых тел на длине волны D-линии Фраунгофера с точностью до 0.0002.

Измерения показателей преломления проводились на образцах кристаллов фторида стронция с примесью эле-

ментов Ho, Er, Tm, использующихся как активаторы для лазерного усиления света. Кристаллы высокого оптического качества были выращены методом Бриджмена из расплава во фторирующей атмосфере. Для измерений из кристаллов изготавливались образцы в виде параллелепипедов длиной  $\sim 20$  мм и поперечными размерами  $5 \times 5$  мм. Все поверхности кристаллов полировались.

Полученные нами значения показателей преломления приведены в табл.1. Мы проследили изменения показателя преломления  $n$  для кристаллов SrF<sub>2</sub> в зависимости от концентрации  $x$  примеси фторида P3 элемента RF<sub>3</sub> (R = Ho, Er, Tm). На рис.1 представлены результаты измерений. Экспериментальные значения показателей преломления  $n$  в данном диапазоне концентраций RF<sub>3</sub> хорошо описываются линейной аппроксимацией.

Полученные данные показывают возможность управления величиной показателя преломления кристаллов фторида стронция с P3 активатором путем малого изменения его концентрации, что позволит создавать планарные волноводы, сердцевина и отражающая оболочка которых практически выполнены из одного фторидного материала. В результате появляется возможность управлять свойствами планарных волноводов – числовой апертурой и числом возбуждаемых мод.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН 1.25П «Фундаментальные и прикладные проблемы фотоники и физика новых оптических материалов», а также РФФИ (грант № 16-02-00338).

Табл.1. Экспериментально измеренные значения показателей преломления образцов кристаллов.

Образец	Состав	Показатель преломления на $\lambda = 589$ нм
0	SrF <sub>2</sub>	1.4380 ± 0.0002
1	SrF <sub>2</sub> + 2% Tm	1.4416 ± 0.0002
2	SrF <sub>2</sub> + 4% Tm	1.4453 ± 0.0002
*	SrF <sub>2</sub> + 10.2% Tm	1.458 ± 0.001
3	SrF <sub>2</sub> + 0.5% Ho	1.4389 ± 0.0002
4	SrF <sub>2</sub> + 1% Ho	1.4401 ± 0.0002
*	SrF <sub>2</sub> + 10% Ho	1.458 ± 0.001
5	SrF <sub>2</sub> + 2% Er	1.4411 ± 0.0002
6	SrF <sub>2</sub> + 4% Er	1.4451 ± 0.0002
*	SrF <sub>2</sub> + 9.7% Er	1.457 ± 0.001

\* Примечание: данные для образцов из работы [3].

1. Конюшкин В.А., Накладов А.Н., Конюшкин Д.В., Дорошенко М.Е., Осико В.В., Карасик А.Я. *Квантовая электроника*, **43** (1), 60 (2013) [*Quantum Electron.*, **43** (1), 60 (2013)].
2. Гришуткина Т.Е., Дорошенко М.Е., Карасик А.Я., Конюшкин В.А., Конюшкин Д.В., Накладов А.Н., Осико В.В., Цветков В.Б. *Квантовая электроника*, **45** (8), 717 (2015) [*Quantum Electron.*, **45** (8), 717 (2015)].
3. Глушкова Т.М., Каримов Д.Н., Кривандина Е.А., Жмурова З.И., Соболев Б.П. *Кристаллография*, **54**, 642 (2009).