

Эффективная генерация монокристаллов твердых растворов $\text{CaF}_2\text{--SrF}_2:\text{Yb}^{3+}$ при диодной лазерной накачке

Т.Т.Басиев, С.В.Васильев, М.Е.Дорошенко, В.А.Конюшкин,
С.В.Кузнецов, В.В.Осико, П.П.Федоров

В концентрационной окрестности седловинной точки тройной системы $\text{CaF}_2\text{--SrF}_2\text{--YbF}_3$ выращены монокристаллы твердых растворов высокого оптического качества. С использованием диодной накачки (980 нм) получена эффективная лазерная генерация с малым стоксовым сдвигом (длина волны генерации 1025 нм, полный КПД (по поглощенной средней мощности) 59 %, дифференциальный КПД 83 %).

Ключевые слова: фторид кальция, фторид стронция, фторид иттербия, монокристаллы, диодная накачка, лазерная генерация.

Как было показано в работах [1, 2], монокристаллы CaF_2 , активированные ионами иттербия, представляют большой интерес для создания эффективных перестраиваемых лазеров и лазерных генераторов ультракоротких импульсов фемтосекундного диапазона. При этом еще в 1993 г. в работе [3] была продемонстрирована перспективность использования фторидных монокристаллов с иттербием для создания лазеров ближнего ИК диапазона. В качестве преимущества фторидных монокристаллов отмечалось большое время жизни; кроме того, наличие различных оптических центров иттербия и их кластеров приводит к существенному неоднородному уширению как линий поглощения, так и линий люминесценции, что дает возможность создания перестраиваемых по частоте лазеров и лазеров фемтосекундного диапазона.

Однако известным на данный момент монокристаллам $\text{CaF}_2:\text{Yb}^{3+}$ присущ ряд как технологических, так и спектроскопических недостатков, которые могут ограничивать их использование. К технологическим недостаткам можно отнести относительную сложность синтеза монокристаллов, связанную с высокой чувствительностью их качества к колебаниям параметров синтеза. Отклонения от оптимальных параметров приводят к образованию ячеистой структуры выращенных монокристаллов, что делает их непригодными для лазерного применения (рис.1). Помимо этого, как известно из работ по легированию фторидных монокристаллов ионами неодима, образование кластерных оптических центров в кристаллах CaF_2 начинается при меньших концентрациях, чем, например, в кристаллах SrF_2 . Поэтому в качестве альтернативы известных кристаллов $\text{CaF}_2:\text{Yb}^{3+}$ были предложены монокристаллы твердых растворов $\text{CaF}_2\text{--SrF}_2:\text{Yb}^{3+}$. Как показали исследования [4, 5], для тройной системы

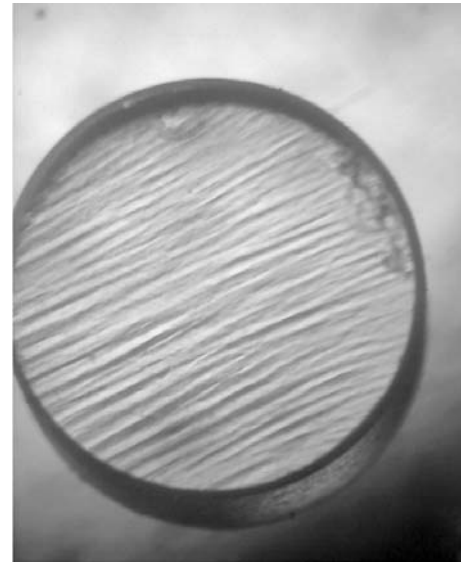


Рис.1. Ячеистая структура монокристалла $\text{CaF}_2:\text{Yb}^{3+}$.

такого типа существует так называемая седловинная точка, в которой составы расплава и кристалла одинаковы, т. е. имеет место конгруэнтное плавление (рис.2). Соответственно в концентрационной окрестности этой точки устойчивость процесса синтеза существенно выше, что позволяет получать высококачественные безъячеистые монокристаллы твердых растворов при молярной концентрации ионов Yb^{3+} на уровне 3 % – 10 %.

Были исследованы спектроскопические и генерационные свойства легированных иттербием материалов на основе фторидов. В качестве образцов использовались пластины, изготовленные из монокристаллов $\text{CaF}_2:\text{Yb}^{3+}$, $\text{SrF}_2:\text{Yb}^{3+}$ и твердых растворов $\text{CaF}_2\text{--SrF}_2:\text{Yb}^{3+}$ толщиной 1–2 мм с молярной концентрацией ионов иттербия 4 % и 6 % для обеспечения примерно 80 %-ного поглощения на длине волны накачки. Для спектроскопических измерений (спектры люминесценции, кинетика затухания люминесценции) образцы возбуждались импульсным перестраиваемым наносекундным лазером на кри-

Т.Т.Басиев, С.В.Васильев, М.Е.Дорошенко, В.А.Конюшкин, С.В.Кузнецов, В.В.Осико, П.П.Федоров. Научный центр лазерных материалов и технологий Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: dorosh@lst.gpi.ru

Поступила в редакцию 31 мая 2007 г., после доработки – 21 августа 2007 г.

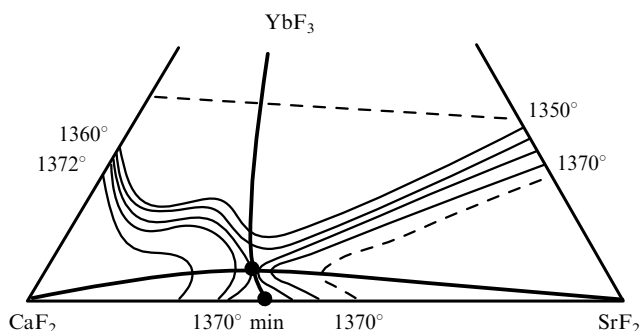


Рис.2. Изотермы ($^{\circ}\text{C}$) поверхности ликвидуса на концентрационном треугольнике системы $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2\text{-YbF}_3$. Жирные линии – сепаратрисы кристаллизационных линий. Выделены седловинная точка с координатами $60 \pm 2\%$ CaF_2 , $34 \pm 2\%$ SrF_2 , $6 \pm 2\%$ YbF_3 ($T = 1370 \pm 5^{\circ}\text{C}$) и точка минимума с координатами 60% $\text{CaF}_2\text{-}40\%$ SrF_2 ($T = 1362^{\circ}\text{C}$). Штриховая линия – граница области существования флюоритового твердого раствора $(\text{Ca}_{1-y}\text{Sr}_y)\text{Yb}_x\text{F}_{2+x}$.

сталле LiF с F_2^+ -центрами окраски. Спектры люминесценции регистрировались с помощью монохроматора МДР-2, в качестве приемника излучения использовался фотоэлектронный умножитель ФЭУ-83, соединенный с цифровым осциллографом TDS 3032. Оцифрованный сигнал записывался персональным компьютером, к которому был также подключен измеритель длины волны LRL-005.

Накачка образцов в генерационных экспериментах осуществлялась линейкой лазерных диодов IPG с волоконным выводом (диаметр волокна 100 мкм) и максимальной выходной мощностью 12 Вт. Излучение линейки лазерных диодов (ЛЛД) фокусировалось в образец короткофокусной линзой ($f = 5$ мм), что позволяло получить диаметр перетяжки пучка накачки около 200 мкм. ЛЛД работала в импульсном режиме с частотой повторения импульсов 5 Гц и длительностью импульса накачки 2 мс. При комнатной температуре длина волны генерации ЛЛД составляла 967 нм, для совмещения длины волны генерации с максимумом поглощения ионов итербия в различных матрицах использовалась температурная подстройка ЛЛД. Выходная мощность излучения генерации измерялась прибором ЕРМ-1000.

На рис.3 приведены спектры коэффициента поглощения для монокристалла твердого раствора $0.7\text{CaF}_2\text{:}0.26\text{SrF}_2\text{:}0.04\text{YbF}_3$ и кристаллов $0.96\text{SrF}_2\text{:}0.04\text{YbF}_3$ и $0.96\text{CaF}_2\text{:}0.04\text{YbF}_3$. Как видно из рисунка, изменение состава приводит к изменению формы спектров поглощения (для твердого раствора появляются дополнительные линии поглощения), к изменению интенсивностей отдельных линий и смещению максимума спектра поглощения, соответствующего бесфонной линии (0–0-переход), в коротковолновую область при добавлении SrF_2 в кристаллическую систему. Нужно отметить, что подобное изменение спектрального положения линий поглощения наблюдалось для ионов неодима в аналогичных тройных системах фторидов. Это позволяет получать требуемые спектроскопические свойства редкоземельного иона, т. е. управлять положением и интенсивностью линий поглощения и люминесценции за счет изменения состава таких твердых растворов.

На рис.4 приведены спектры люминесценции монокристаллов $0.96\text{CaF}_2\text{:}0.04\text{YbF}_3$, $0.96\text{SrF}_2\text{:}0.04\text{YbF}_3$ и твердого раствора $0.7\text{CaF}_2\text{:}0.26\text{SrF}_2\text{:}0.04\text{YbF}_3$. Видно, что при переходе от фторида кальция к фториду стронция и

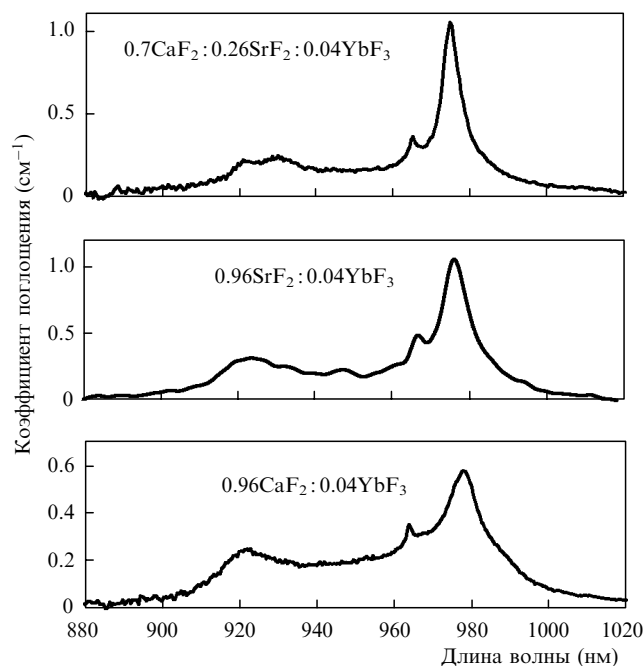


Рис.3. Спектры коэффициента поглощения монокристаллов $0.7\text{CaF}_2\text{:}0.26\text{SrF}_2\text{:}0.04\text{YbF}_3$, $0.96\text{SrF}_2\text{:}0.04\text{YbF}_3$ и $0.96\text{CaF}_2\text{:}0.04\text{YbF}_3$.

далее к твердому раствору $0.7\text{CaF}_2\text{:}0.26\text{SrF}_2\text{:}0.04\text{YbF}_3$ положение максимума спектра люминесценции смещается в коротковолновую область. При этом помимо смещения в коротковолновую область наблюдается сужение самой интенсивной люминесцентной линии, соответствующей 0–0-переходу. По-видимому, это связано с уменьшением числа различных оптических центров иона YbF_3 , которое приводит к уменьшению неоднородного уширения линий поглощения и люминесценции. Следует отметить, что подобное сужение 0–0-линии наблюдается и в спектре поглощения (см. рис.3).

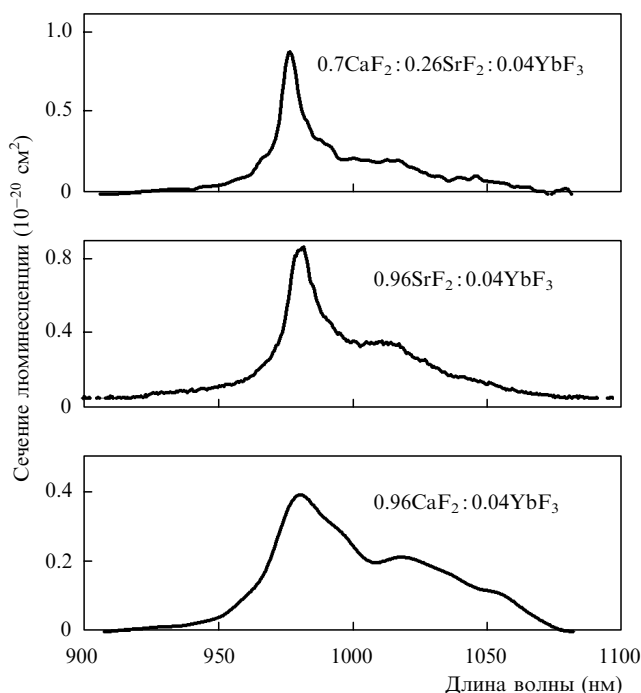


Рис.4. Спектры сечения люминесценции монокристаллов $0.7\text{CaF}_2\text{:}0.26\text{SrF}_2\text{:}0.04\text{YbF}_3$, $0.96\text{SrF}_2\text{:}0.04\text{YbF}_3$ и $0.96\text{CaF}_2\text{:}0.04\text{YbF}_3$.

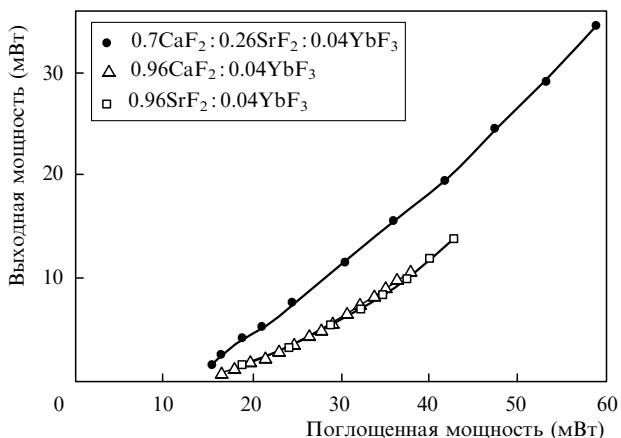


Рис.5. Зависимости средней выходной мощности генерации монокристаллов $0.7\text{CaF}_2:0.26\text{SrF}_2:0.04\text{YbF}_3$, $0.96\text{SrF}_2:0.04\text{YbF}_3$ и $0.96\text{CaF}_2:0.04\text{YbF}_3$ от поглощенной мощности накачки.

Для всех образцов была измерена кинетика затухания люминесценции при их возбуждении наносекундными импульсами перестраиваемого лазера на кристалле LiF с F_2^+ -центрами окраски. Кинетика затухания люминесценции имела одноэкспоненциальный вид для всех исследованных монокристаллов. В результате анализа кинетики затухания установлено, что при молярной концентрации ионов иттербия 4 % время жизни в кристалле CaF_2 составляет 1.8 мс, в кристалле SrF_2 – 2.5 мс и в твердом растворе $0.7\text{CaF}_2:0.26\text{SrF}_2$ – 2.0 мс.

Исследование генерационных свойств ионов иттербия во фторидных монокристаллах проводилось в резонаторе, образованном плоским дихроичным зеркалом с пропусканием 95 % в диапазоне длин волн 969–981 нм (длина волны генерации ЛЛД подстраивалась температурой под максимум поглощения каждого монокристалла) и коэффициентом отражения 100 % на $\lambda = 1015 - 1070$ нм (рис.5). В качестве выходного зеркала использовалось сферическое зеркало с радиусом кривизны 100 мм, расположенное на расстоянии 45 мм от плоского дихроичного зеркала, т. е. конфигурация резонатора была близка к конфокальной. Коэффициент отражения выходного зеркала варьировался от 75 % до 95 %.

На рис.5 приведены зависимости выходной мощности генерации лазеров на монокристаллах $0.96\text{CaF}_2:0.04\text{YbF}_3$, $0.96\text{SrF}_2:0.04\text{YbF}_3$ и твердого раствора $0.7\text{CaF}_2:0.26\text{SrF}_2:0.04\text{YbF}_3$ от поглощенной мощности накачки для оптимального коэффициента отражения выходного зеркала 95 %. Видно, что твердый раствор имеет более низкий порог генерации по сравнению с обоими монокристаллами, что обусловлено его более высоким оптическим качеством. При этом для монокристалла твердого раствора $0.7\text{CaF}_2:0.26\text{SrF}_2:0.04\text{YbF}_3$ максимальный КПД генерации (по поглощенной мощности накачки) 59 % был получен при дифференциальном КПД 83 %. Для кристаллов SrF_2 и CaF_2 порог генерации оказался примерно в полтора раза выше, а максимальный КПД генерации составил 32 %. Необходимо отметить, что несмотря на более высокий порог и относительно более низкий максимальный КПД генерации этих кристаллов, их дифференциальный КПД был близок к таковому для твердого раствора и составил 78 %.

На рис.6 приведены спектры генерации монокристаллов $0.96\text{CaF}_2:0.04\text{YbF}_3$ и $0.96\text{SrF}_2:0.04\text{YbF}_3$ и твердого раствора $0.7\text{CaF}_2:0.26\text{SrF}_2:0.04\text{YbF}_3$. Как видно из ри-

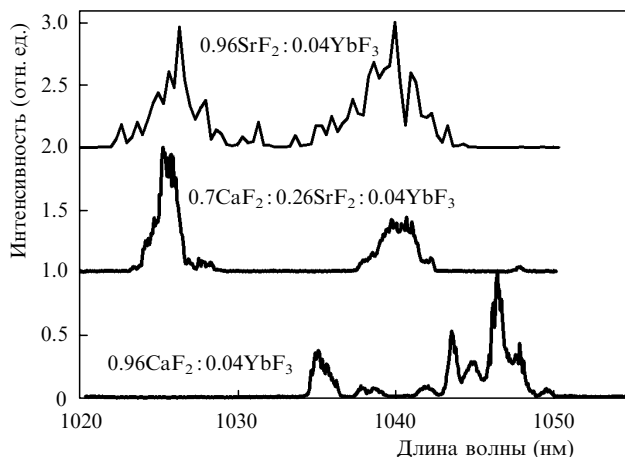


Рис.6. Спектры генерации монокристаллов $0.96\text{SrF}_2:0.04\text{YbF}_3$, $0.7\text{CaF}_2:0.26\text{SrF}_2:0.04\text{YbF}_3$ и $0.96\text{CaF}_2:0.04\text{YbF}_3$, зарегистрированные с помощью измерителя длин волн LRL-005.

сунка, в неселективном резонаторе спектр генерации кристалла CaF_2 достаточно широкий, с максимумом вблизи 1045 нм. При этом в полностью съюстированном резонаторе генерация как кристалла SrF_2 , так и твердого раствора происходит на длине волны вблизи 1040 нм. Однако внесение небольших дополнительных потерь (например, разъюстировка активного элемента от перпендикулярного положения) приводит к возникновению генерации на длине волны вблизи 1025 нм; при этом в зависимости от величины дополнительных потерь возможна генерация на обеих линиях одновременно или на любой из линий в отдельности.

На рис.7 приведены перестроечные кривые лазеров на монокристалле $0.96\text{SrF}_2:0.04\text{YbF}_3$ и твердого раствора $0.7\text{CaF}_2:0.26\text{SrF}_2:0.04\text{YbF}_3$ в селективном резонаторе с 60° -ной стеклянной призмой в качестве селектирующего элемента. Перестройка для обоих лазеров происходит в пределах отдельных линий, при этом возможна генерация на длине волны короче 1025 нм, которая может быть получена и в неселективном резонаторе. В промежутках между этими указанными линиями перестройка не получалась: сначала генерация возникала на двух линиях одновременно, а затем скачкообразно переходила на другую длину волны. Наиболее коротковолновая генерация была получена на длине волны 1013 нм, а самая длинноволновая – на длине волны 1044 нм.

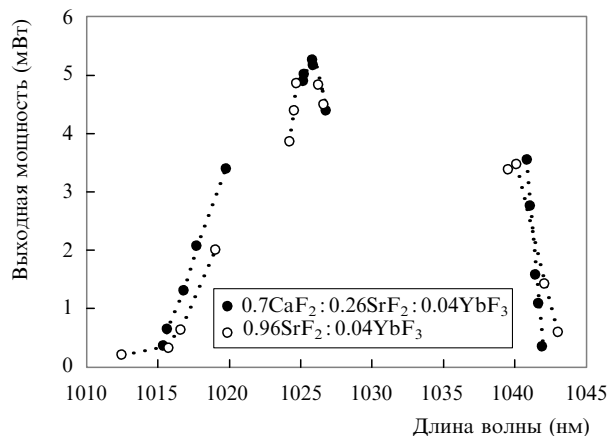


Рис.7. Перестроечные кривые лазеров на монокристаллах $0.96\text{SrF}_2:0.04\text{YbF}_3$ и $0.7\text{CaF}_2:0.26\text{SrF}_2:0.04\text{YbF}_3$ в резонаторе с селектирующей призмой.

Таким образом, впервые получена генерация на монокристалле $0.96\text{SrF}_2:0.04\text{YbF}_3$ и твердом растворе $0.7\text{CaF}_2:0.26\text{SrF}_2:0.04\text{YbF}_3$. Важно отметить, что процесс синтеза монокристаллов твердых растворов $\text{CaF}_2\text{-SrF}_2:\text{YbF}_3$ более прост, чем синтез монокристаллов типа $\text{MeF}_2:\text{YbF}_3$ ($\text{Me} = \text{Ca}, \text{Sr}$), что обеспечивает более высокое оптическое качество кристалла, более низкий порог генерации и более высокую эффективность (полный КПД составляет 53 %, дифференциальный КПД – 83 %) лазеров на их основе. Спектр генерации твердого раствора близок к спектру генерации кристалла $\text{SrF}_2:\text{YbF}_3$, при этом возможно получение коротковолновой генерации на длине волны 1025 нм в неселективном резонаторе. Это позволяет разрабатывать лазеры с малым тепловыделением и

малым стоксовым сдвигом между длиной волны накачки (980 нм) и длиной волны генерации (1025 нм).

1. Lucca A., Debourg G., Jacquemet M., Druon F., Balembois F., Georges P., Camy P., Doulan J.L., Moncorge R. *Opt. Lett.*, **29** (23), 2767 (2004).
2. Ito M., Goutaudier Ch., Guyot Y., Lebbou K., Fukuda T., Boulon G. *J. Phys. Condens. Matter*, **16**, 1501 (2004).
3. Krupke W.F. *IEEE J. Selected Topics Quantum Electron.*, **6** (6), 1287 (2000).
4. Стасюк В.А. *Канд. дисс.* (М., МИХТ им. М.В. Ломоносова, 1998, 147 с.).
5. Федоров П.П., Бучинская И.И., Стасюк В.А. В сб. *Физика кристаллизации. К 100-летию Леммлейна* (М.: Физматлит, 2002, с. 220–245).