

# Возбуждение фотолюминесценции в оксидных и фторидных кристаллах, легированных ионами Er

© В.И. Барышников\*,\*\*,\*\*\*, В.В. Криворотова\*\*\*

\* Иркутский филиал института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, 664033 Иркутск, Россия

\*\* Научно-исследовательский институт прикладной физики Иркутского государственного университета, 664003 Иркутск, Россия

\*\*\* Иркутский государственный университет путей сообщения, 664074 Иркутск, Россия

E-mail: vib@api.isu.ru

Установлено, что при лазерном возбуждении инфракрасного излучения ( $2.9 \mu\text{m}$ ) в оксидных и фторидных кристаллах, легированных ионами  $\text{Er}^{3+}$ , происходит возбуждение сопутствующей люминесценции в видимом диапазоне спектра по нелинейному двухступенчатому механизму.

PACS: 78.55.Hx, 71.55.Ht

## 1. Введение

С развитием микроэлектроники, а именно с созданием мощных миниатюрных полупроводниковых лазеров, появилось новое направление в разработке квантовой электронной техники — создание и развитие эффективных малогабаритных твердотельных лазеров с полупроводниковой накачкой [1]. В рамках данного направления необходимость разработки лазеров в диапазоне  $2\text{--}3 \mu\text{m}$  обусловила интенсивные исследования вынужденного излучения кристаллов на основе сложных фторидов и оксидов с высокой концентрацией примеси Er [2]. При оптической накачке таких сред наряду с инфракрасным излучением наблюдаются зеленые и красные спектральные линии [3,4]. В дальнейшем для контроля и настройки ИК-диагностических систем был разработан кристаллический суперлюминесцентный ИК ( $2.9 \mu\text{m}$ ) излучатель ( $\text{Er}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ ) с лазерной диодной накачкой с сопутствующим свечением в зеленой области спектра [5]. Видимое сопутствующее излучение является точным указателем ИК-пятна. Поэтому такое устройство удобно использовать для дистанционного контроля чувствительности и быстродействия ИК-регистрирующей аппаратуры в диапазоне  $2\text{--}3 \mu\text{m}$ . При повышении интенсивности лазерной накачки  $\text{Er}:\text{BaY}_2\text{F}_8$  кристаллов обнаружено снижение квантового выхода ИК-люминесценции и увеличение интенсивности сопутствующего зеленого свечения [5]. Очевидно, что путем оптимизации параметров лазерной накачки кристаллов  $\text{Er}:\text{BaY}_2\text{F}_8$  можно достичь достаточно высокой эффективности возбуждения ИК-излучения. Вместе с тем необходимо определить, какие закономерности характерны при лазерном возбуждении ИК- и сопутствующего видимого излучения в кристаллах, легированных эрбием, и как при этом представляются электронные переходы в системе энергетических уровней ионов  $\text{Er}^{3+}$ .

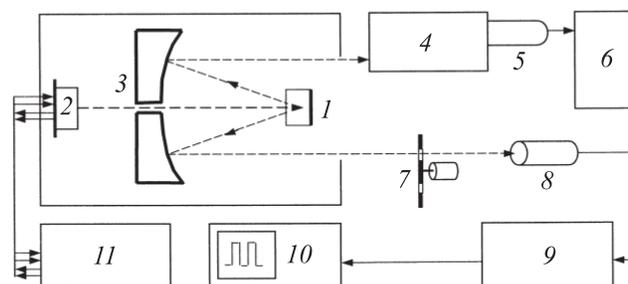
Настоящая работа посвящена исследованию механизмов лазерного возбуждения ИК- и видимого сопутствующего

излучения примесных ионов эрбия в сложных фторидных и оксидных кристаллах.

## 2. Объекты, методы и техника исследований

Исследуемые образцы одинаковых размеров представляли собой полированные с торцов монокристаллы  $\text{BaY}_2\text{F}_8$ ,  $\text{Er}:\text{YLiF}_4$ ,  $\text{YAlO}_3$ ,  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  с примесью  $\text{Er}^{3+}$ , которые устанавливались в плоскоперконфокальную зеркальную оптическую систему (излучатель). Размер кристаллов  $4 \times 2 \times 1.5 \text{ mm}$ . Лазерная накачка кристалла осуществлялась через отверстие в сферическом зеркале. Система накачки состояла из мощного ( $P = 1 \text{ W}$ ,  $\lambda = 970 \text{ nm}$  или  $P = 1 \text{ W}$ ,  $\lambda = 790 \text{ nm}$ ) лазерного диода в сочетании с системой охлаждения на элементе Пельтье, терморезистором, делительной кварцевой пластинкой с фотодиодом обратной связи и микролинзой.

В данной оптической схеме при лазерной накачке кристаллов  $\text{Er}:\text{BaY}_2\text{F}_8$  наблюдается интенсивная ИК-люминесценция на длине волны  $2.5 \mu\text{m}$ . При этом возбужда-



**Рис. 1.** Структурная схема экспериментальной установки. 1 — исследуемый кристалл, 2 — лазерный диод, 3 — сферическое зеркало, 4 — монохроматор, 5 — ФЭУ, 6 — самописец, 7 — механический 100% модулятор оптического излучения, 8 — болометр, 9 — усилитель, 10 — осциллограф, 11 — прецизионный микропроцессорный модуль лазерного диода.

ется сопутствующее зеленое свечение, которое фокусируется сферическим зеркалом в пространстве так же, как ИК-излучение, и является визуализатором ИК-луча. Изучение сопутствующей люминесценции кристаллов в видимом диапазоне спектра производилось посредством регистрирующей системы (рис. 1), состоящей из решеточного монохроматора МДР-23 и малошумящего фотоэлектронного умножителя ФЭУ-106, охлаждаемого элементами Пельтье до  $-70^\circ\text{C}$ .

Для наблюдения люминесценции в ИК-диапазоне спектра излучатель с исследуемым кристаллом был также состыкован с регистрирующей системой (рис. 1), содержащей вращающийся 100% модулятор светового пучка, болометр БП-2 с RC-фильтром на выходе усилителя (полоса пропускания 10–80 Hz). Сигнал с усилителя болометра поступал на вход осциллографа для измерения амплитуды ИК-люминесценции кристаллов. Электронный микропроцессорный модуль обеспечивал прецизионную стабилизацию температуры с погрешностью 0.1% и помехоустойчивое высокостабильное напряжение на мощном лазерном диоде накачки.

### 3. Механизмы возбуждения фотолюминесценции кристаллов, легированных ионами $\text{Er}^{3+}$

Механизмы оптического возбуждения примеси  $\text{Er}^{3+}$  были исследованы в кристаллах  $\text{Er}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ,  $\text{Er}:\text{YAlO}_3$ ,  $\text{Er}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ ,  $\text{Er}:\text{YLiF}_4$ , которые облучались некогерентным (ламповым) и затем лазерным источниками света при одинаковой поглощенной мощности. Результаты экспериментов показывают, что во всех исследованных кристаллах при ламповом возбуждении достигается одинаковый выход ИК-люминесценции. Однако при лазерном воздействии интенсивность ИК-излучения в этой же группе кристаллов различна. Это свидетельствует о наличии конкурирующих механизмов в канале возбуждения ИК-люминесценции ионов  $\text{Er}^{3+}$ . Данный вывод подтверждается появлением сопутствующего зеленого и красного свечения при лазерном облучении указанных кристаллов. Для определения выхода люминесценции ионов  $\text{Er}^{3+}$  измерены спектры излучения кристаллов  $\text{Er}:\text{BaY}_2\text{F}_8$  при лазерном и ламповом возбуждении. Спектральные данные (рис. 2) показывают, что при лазерной накачке кристаллов  $\text{Er}:\text{BaY}_2\text{F}_8$  наблюдаются интенсивные зеленая и красная линии люминесценции. Причем их структура и спектральное распределение соответствуют известным излучательным электронным переходам в ионах  $\text{Er}^{3+}$  [4]. Таким образом, сопутствующие линии люминесценции в видимой области спектра при лазерном облучении ( $\lambda = 970 \text{ nm}$ ) кристаллов  $\text{Er}:\text{BaY}_2\text{F}_8$  обусловлены свечением редкоземельных ионов  $\text{Er}^{3+}$ . Вместе с тем в этих же кристаллах  $\text{Er}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ , возбуждаемых таким же по мощности ИК- ( $\lambda = 960\text{--}980 \text{ nm}$ ) ламповым излучением, люминесценция в видимой области спектра не наблюдается (рис. 2).

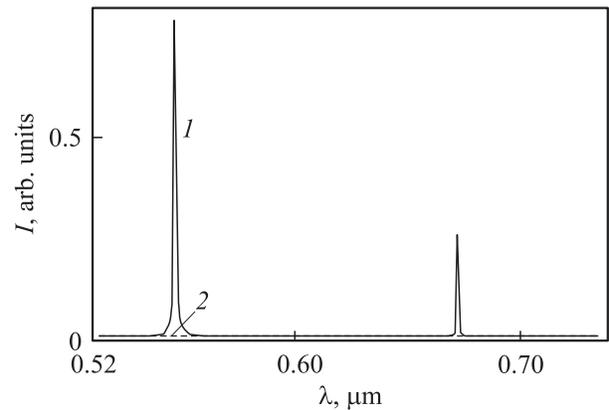


Рис. 2. Спектры люминесценции кристалла  $\text{Er}:\text{BaY}_2\text{F}_8$  при  $T = 300 \text{ K}$ . 1 — возбуждение излучением полупроводникового лазера ( $\lambda = 970 \text{ nm}$ ), 2 — ламповое возбуждение ( $\lambda = 960\text{--}980 \text{ nm}$ ).

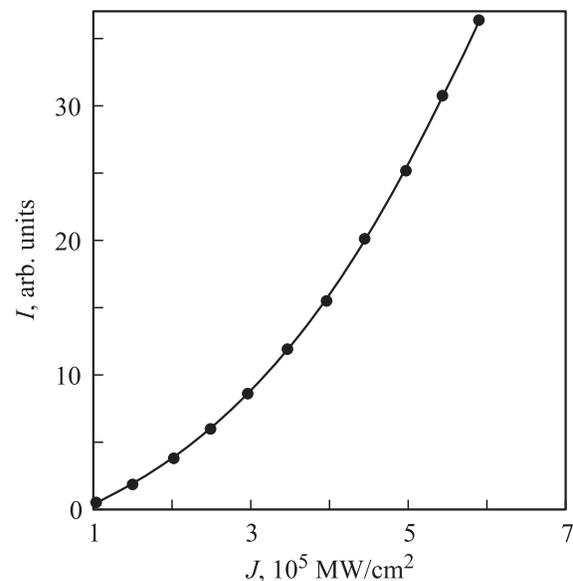
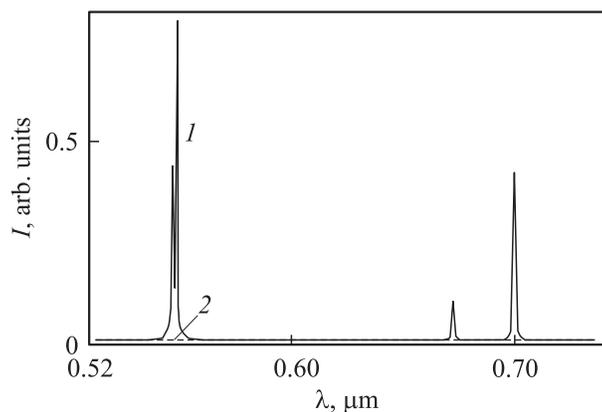


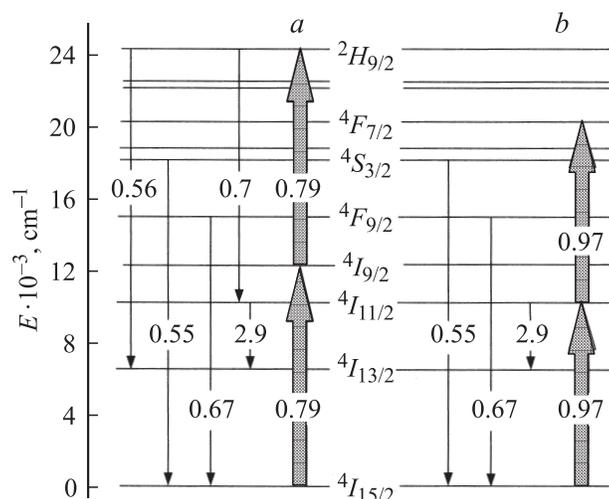
Рис. 3. Зависимость интенсивности зеленой линии ( $\lambda = 550 \text{ nm}$ ) люминесценции в кристаллах  $\text{Er}:\text{BaY}_2\text{F}_8$  от плотности мощности лазерного облучения с длиной волны  $\lambda = 970 \text{ nm}$ ,  $T = 300 \text{ K}$ .

Для уточнения проведены исследования люминесценции кристаллов  $\text{Er}:\text{YLiF}_4$ ,  $\text{Er}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ,  $\text{Er}:\text{YAlO}_3$  при тех же параметрах лазерного и лампового воздействия. Установлено, что в данной группе кристаллов, как и в  $\text{Er}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ , наблюдаются линии сопутствующей видимой люминесценции  $\text{Er}^{3+}$  только при лазерном возбуждении.

Полученные результаты не совместимы с кооперативным механизмом возбуждения видимого излучения, поскольку зеленые и красные линии не регистрируются при ламповом облучении кристаллов, когда достигается практически та же концентрация возбужденных ионов эрбия, что и при лазерном воздействии. Кроме того, можно считать, что в основе механизма лазер-



**Рис. 4.** Спектры люминесценции кристалла  $\text{Er}:\text{BaY}_2\text{F}_8$  при  $T = 300\text{ K}$ . 1 — возбуждение излучением полупроводникового лазера ( $\lambda = 790\text{ nm}$ ), 2 — ламповое возбуждение ( $\lambda = 780\text{--}800\text{ nm}$ ).



**Рис. 5.** Схемы возбуждения люминесценции в кристаллах  $\text{Er}:\text{BaY}_2\text{F}_8$  излучением лазера с длиной волны  $\lambda = 790$  (a) и  $970\text{ nm}$  (b). Длины волн света, излучаемого (поглощаемого) при оптических переходах, даны в микрометрах.

ного возбуждения люминесценции  $\text{Er}^{3+}$  во фторидных и кислородсодержащих кристаллах лежит единая закономерность. Действительно, при одинаковой мощности  $\sim 1\text{ W}$  в области  $\lambda = 970\text{ nm}$  излучение полупроводникового лазера имеет спектральную ширину около  $2\text{ nm}$ , а ламповое —  $20\text{ nm}$ . Сформированный микротелескопом диаметр лазерного пучка в области гауссовой перетяжки достигает  $10\text{ }\mu\text{m}$ , а максимально достижимый диаметр оптического пучка мощной ( $500\text{ W}$ ) галогенной лампы составляет  $3\text{ mm}$ . Таким образом, спектральная плотность мощности лазерного пучка достигает  $0.5\text{ MW/cm}^2 \cdot \text{nm}$ , а лампового пучка соответствует  $\sim 0.5\text{ W/cm}^2 \cdot \text{nm}$ . Спектральная интенсивность лазерного облучения исследуемых кристаллов на шесть порядков превосходит ламповое возбуждение. Возбуждение кристаллов ламповым излучением определяют

как „мягкий“ тип накачки, а лазерным — как „жесткий“ [6,7]. Таким образом, особенности возбуждения зеленых и красных линий люминесценции в кристаллах  $\text{Er}:\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ,  $\text{Er}:\text{YAlO}_3$ ,  $\text{Er}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ ,  $\text{Er}:\text{YLiF}_4$  могут быть связаны с высокой спектральной интенсивностью (до  $0.5\text{ MW/cm}^2 \cdot \text{nm}$ ) излучения полупроводникового лазера ( $P = 1\text{ W}$ ,  $\lambda = 970\text{ nm}$ ). При интенсивности оптического воздействия  $0.1\text{--}1.0\text{ MW/cm}^2 \cdot \text{nm}$  должны проявляться нелинейное поглощение и, в частности, двухступенчатый механизм возбуждения красных и зеленых линий люминесценции  $\text{Er}^{3+}$ . Для проверки данного предположения измерена зависимость выхода зеленой люминесценции в кристаллах  $\text{Er}:\text{BaY}_2\text{F}_8$  от плотности мощности лазерного облучения. В данном эксперименте зарегистрирована квадратичная закономерность (рис. 3). Полученный результат указывает на двухступенчатый механизм возбуждения  $^4F_{7/2}$ -состояния, которое с учетом результатов, представленных на рис. 2, связано с излучательными переходами, ответственными за линии люминесценции  $550$  и  $670\text{ nm}$ . В пользу данного механизма свидетельствуют также ИК-свечение ( $2.9\text{ }\mu\text{m}$ ) и сопутствующие линии люминесценции  $560$  и  $700\text{ nm}$  (рис. 4), возбуждаемые в кристаллах  $\text{Er}:\text{BaY}_2\text{F}_8$  более коротковолновым лазерным излучением ( $P = 1\text{ W}$ ,  $\lambda = 790\text{ nm}$ ). При этом линии люминесценции  $560$  и  $700\text{ nm}$  обусловлены электронными переходами с уровня  $^2H_{9/2}$ . В соответствии с результатами экспериментов (рис. 2, 4) с учетом табличных данных [8] механизм лазерного возбуждения сопутствующих зеленых и красных линий люминесценции в кристаллах  $\text{Er}:\text{BaY}_2\text{F}_8$  можно представить электронными переходами в системе энергетических уровней ионов  $\text{Er}^{3+}$  (рис. 5).

Таким образом, при лазерном облучении фторидных и оксидных кристаллов, легированных примесью  $\text{Er}^{3+}$ , возбуждение ИК-свечения ( $2.9\text{ }\mu\text{m}$ ) происходит по однофотонному механизму, а сопутствующие линии люминесценции в видимом диапазоне спектра появляются в результате двухступенчатого механизма возбуждения.

## Список литературы

- [1] Н.И. Кравцов. Квантовая электрон. **31**, 659 (2001).
- [2] U. Brauch, G. Huber, M. Karsewsky, C. Siewen, A. Voss. Opt. Lett. **20**, 713 (1995).
- [3] L.F. Johnson, H.J. Guggenheim. Appl. Phys. Lett. **20**, 474 (1972).
- [4] А.А. Каминский. Лазерные кристаллы. Наука. М. (1975). 256 с.
- [5] В.И. Барышников, А.И. Илларионов, В.В. Криворотова. X Междунар. школа-семинар. Иркутск (2006). С. 20.
- [6] В.И. Барышников, Т.А. Колесникова. Квантовая электрон. **23**, 779 (1996).
- [7] В.И. Барышников, С.В. Дорохов, Т.А. Колесникова. Опт. и спектр. **89**, 62 (2000).
- [8] А.А. Каплянский, Б.З. Малкин, В.В. Овсянкин, А.К. Пржевудский, А.И. Рыскин. Спектроскопия кристаллов. Наука. Л. (1983). 230 с.