

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 Er^{3+} , происходит возбуждение сопутствующей люминесценции в видимом диапазоне спектра по нелинейному двухступенчатому механизму.

PACS: 78.55.Nx, 71.55.Nt

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 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 BaY_2F_8 , $\text{Er}:\text{YLiF}_4$, YAlO_3 , $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ с примесью Er^{3+} , которые устанавливались в плоскопереконфокальную 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-

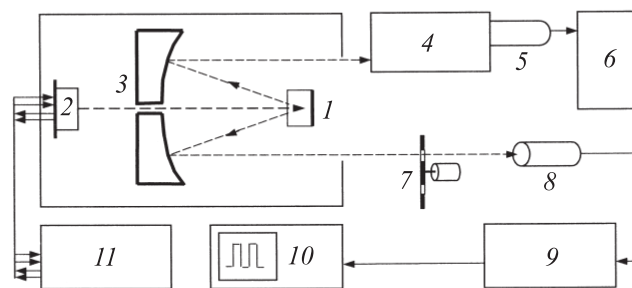


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки. 1 — исследуемый кристалл, 2 — лазерный диод, 3 — сферическое зеркало, 4 — монохроматор, 5 — ФЭУ, 6 — самописец, 7 — механический 100% модулятор оптического излучения, 8 — болометр, 9 — усилитель, 10 — осциллограф, 11 — прецизионный микропроцессорный 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°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 Er^{3+}

Механизмы оптического возбуждения примеси 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 Er^{3+} . Данный вывод подтверждается появлением сопутствующего зеленого и красного свечения при лазерном облучении указанных кристаллов. Для определения выхода люминесценции ионов 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 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 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).

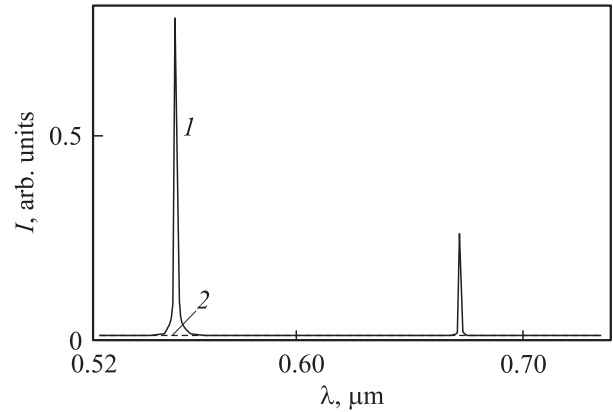


Рис. 2. Спектры люминесценции кристалла $\text{Er}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ при $T = 300 \text{ K}$. 1 — возбуждение излучением полупроводникового лазера ($\lambda = 970 \text{ nm}$), 2 — ламповое возбуждение ($\lambda = 960\text{--}980 \text{ nm}$).

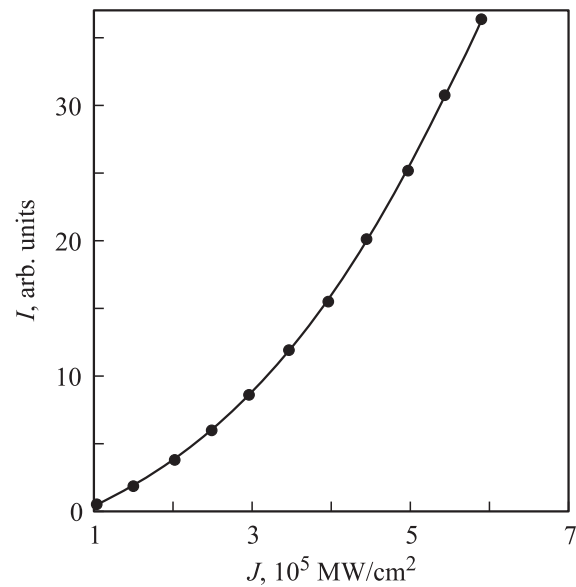


Рис. 3. Зависимость интенсивности зеленой линии ($\lambda = 550 \text{ nm}$) люминесценции в кристаллах $\text{Er}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ от плотности мощности лазерного облучения с длиной волны $\lambda = 970 \text{ nm}$, $T = 300 \text{ K}$.

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 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-

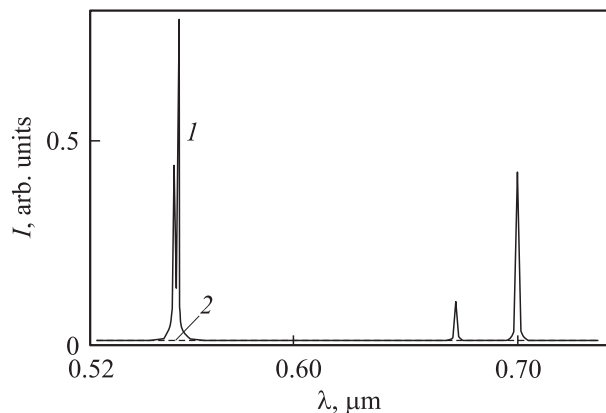


Рис. 4. Спектры люминесценции кристалла $\text{Er}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ при $T = 300\text{ K}$. 1 — возбуждение излучением полупроводникового лазера ($\lambda = 790\text{ nm}$), 2 — ламповое возбуждение ($\lambda = 780\text{--}800\text{ nm}$).

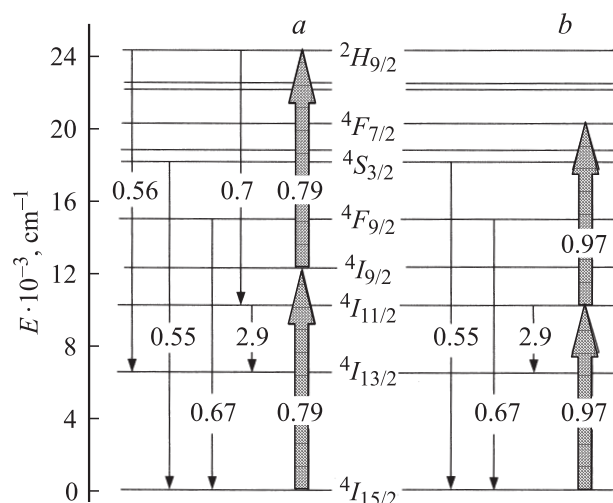


Рис. 5. Схемы возбуждения люминесценции в кристаллах $\text{Er}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ излучением лазера с длиной волны $\lambda = 790$ (a) и 970 nm (b). Длины волн света, излучаемого (поглощаемого) при оптических переходах, даны в микрометрах.

ного возбуждения люминесценции 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 nm , а ламповое — 20 nm . Сформированный микротелескопом диаметр лазерного пучка в области гауссовой перетяжки достигает $10\text{ }\mu\text{m}$, а максимально достижимый диаметр оптического пучка мощной (500 W) галогенной лампы составляет 3 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 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 nm . В пользу данного механизма свидетельствуют также ИК-свечение ($2.9\text{ }\mu\text{m}$) и сопутствующие линии люминесценции 560 и 700 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 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 Er^{3+} (рис. 5).

Таким образом, при лазерном облучении фторидных и оксидных кристаллов, легированных примесью 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.