

Эффективность заселения уровня ${}^4I_{13/2}$ иона Er^{3+} и возможность генерации излучения с длиной волны 1.5 мкм в ИАГ : Yb, Er при высоких температурах

Б.И.Галаган, Б.И.Денкер, В.В.Осико, С.Е.Сверчков

Показано, что при повышении температуры кристалла ИАГ : Yb, Er от комнатной до 400–600 °С в несколько раз возрастает эффективность накопления энергии на уровне ${}^4I_{13/2}$ иона Er^{3+} при оптической накачке, идущей через ионы Yb^{3+} . В этих условиях до 60 % ионов эрбия могут быть переведены в возбужденное состояние, что позволяет надеяться на реализацию в ИАГ : Yb, Er лазерной генерации на длине волны 1.54 мкм по трехуровневой схеме.

Ключевые слова: алюмоиттриевый гранат, иттербий-эрбиевый лазер с длиной волны 1.5 мкм.

Эрбиевые лазеры с длиной волны $\lambda = 1.54$ мкм (переход ${}^4I_{13/2} - {}^4I_{15/2}$ иона Er^{3+}) весьма привлекательны для целого ряда применений. В настоящее время список материалов, из которых изготавливаются активные объемные (не волоконные) элементы таких лазеров, практически ограничивается иттербий-эрбиевыми стеклами на фосфатной основе. Ионы Yb^{3+} в них выполняют роль сенситизаторов, которые поглощают излучение накачки в области 0.9–1 мкм и безызлучательно передают энергию возбуждения ионам Er^{3+} (рис.1).

Особенностью фосфатных стекол является сочетание высокого (близкого к 100 %) квантового выхода люминесценции с верхнего лазерного уровня ${}^4I_{13/2}$ иона Er^{3+} (время жизни которого составляет ~ 7 мс) с весьма малым (1–2 мкс) временем жизни уровня ${}^4I_{11/2}$ этого же иона. Благодаря быстрой многофононной релаксации с уровня ${}^4I_{11/2}$ в фосфатных стеклах резко ослаблены как обратная передача возбуждений с уровня ${}^4I_{11/2}$ Er^{3+} на резонансный с ним уровень ${}^4F_{5/2}$ Yb^{3+} , так и ряд паразитных ап-конверсионных процессов (рис.1). Это позволяет использовать иттербий-эрбиевые фосфатные стекла в качестве эффективной лазерной среды для трехуровневой схемы генерации иона Er^{3+} с $\lambda \sim 1.54$ мкм.

Недостатком стекла как лазерного материала является низкая теплопроводность (на порядок хуже, чем у многих известных лазерных кристаллов). Это означает легкость теплового разрушения стекол излучением накачки и ограничивает среднюю мощность генерации лазеров на них.

К сожалению, кристаллы с указанным выше сочетанием времен жизни возбужденных состояний эрбия не известны. Тем не менее одной из интересных матриц, исследуемых в этом направлении, является кристалл иттрий-алюминиевого граната (ИАГ). Так, в работе [1] при накачке кристалла ИАГ : Yb, Er в полосу поглощения иттербия при комнатной температуре была осуществлена генерация с $\lambda \sim 1.6$ мкм и КПД ~ 7 %. Это стало возмож-

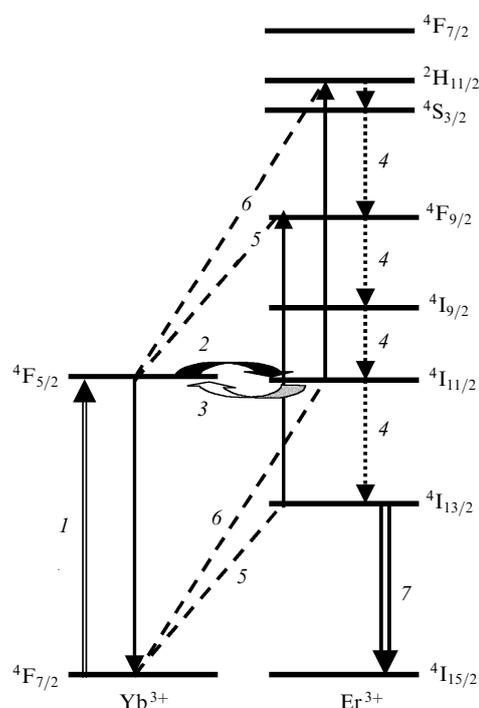


Рис.1. Схема энергетических уровней и процессов переноса электронных возбуждений в иттербий-эрбиевых системах:

1 – оптическая накачка в полосу поглощения иттербия; 2, 3 – прямой и обратный безызлучательные переходы; 4 – многофононная релаксация; 5, 6 – ап-конверсионные процессы; 7 – лазерный переход.

ным благодаря квазичетырехуровневой схеме лазерного перехода с метастабильного уровня ${}^4I_{13/2}$ Er^{3+} на верхние штарковские подуровни основного состояния ${}^4I_{15/2}$. В работе [2] мы обратили внимание на то, что спектрально-кинетические особенности ИАГ : Yb, Er претерпевают значительные изменения при повышении температуры кристалла на несколько сотен градусов. В частности, было показано, что с ростом температуры от комнатной до 800 °С время жизни уровня ${}^4I_{11/2}$ иона Er^{3+} уменьшается со 100 до 6 мкс и в несколько раз увеличивается скорость безызлучательного переноса возбуждений в системе $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Er}^{3+}$, при этом время жизни верхнего лазерного уровня остается практически неизменным. Это дало

Б.И.Галаган, Б.И.Денкер, В.В.Осико, С.Е.Сверчков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: galagan@ran.gpi.ru, denker@Lst.gpi.ru

Поступила в редакцию 15 мая 2007 г.

основание полагать, что кристалл ИАГ: Yb, Er в нагретом состоянии может служить перспективной средой для получения генерации на переходе ${}^4I_{13/2} - {}^4I_{15/2}$ ионов эрбия с $\lambda \sim 1.54$ мкм по трехуровневой схеме (как в иттербий-эрбиевых стеклах при комнатной температуре). В [2] были оценены оптимальные для осуществления такой генерации концентрации активаторов ($(1 - 1.4) \times 10^{21}$ см $^{-3}$ для Yb $^{3+}$ и $(7 - 10) \times 10^{19}$ см $^{-3}$ для Er $^{3+}$) и температура (около 600 °C). Однако эти исследования проводились только при низких уровнях возбуждения ионов эрбия в условиях практического отсутствия нелинейных ап-конверсионных процессов, неизбежное развитие которых при увеличении интенсивности накачки может существенным образом повлиять на достижение инверсной населенности на переходе ${}^4I_{13/2} - {}^4I_{15/2}$, поскольку, как известно, трехуровневая схема генерации требует возбуждения не менее 50% активных частиц. Таким образом, вопрос о возможности получения генерации в ИАГ: Yb, Er на длине волны 1.54 мкм остается открытым.

Предметом настоящей работы явилось изучение зависимостей эффективности накопления энергии на верхнем лазерном уровне ${}^4I_{13/2}$ иона эрбия от плотности энергии накачки и температуры кристалла ИАГ: Yb, Er.

Исследуемые образцы – плоскопараллельные полированные пластины диаметром 7 мм и толщиной 1 мм были вырезаны из выращенного методом горизонтальной направленной кристаллизации кристалла с концентрацией ионов 6.9×10^{19} см $^{-3}$ (Er $^{3+}$) и 1.38×10^{21} см $^{-3}$ (Yb $^{3+}$).

Схема эксперимента по определению населенности верхнего лазерного уровня эрбия была аналогична примененной нами ранее в [3] при исследовании иттербий-эрбиевых фосфатных стекол, которые в настоящей работе также использовались для сравнения и дополнительной калибровки. Возбуждение иттербий-эрбиевых образцов осуществлялось в полосу поглощения иттербия излучением лазера на неодимовом фосфатном стекле с длиной волны генерации 1.055 мкм. Лазер работал в режиме свободной генерации с длительностью импульса ~ 1 мс и энергией около 10 Дж, его излучение фокусировалось на образцы в пятно размером около 2 мм. В экспериментах регистрировалась интенсивность люминесценции в области 1.5 мкм в зависимости от поглощенной энергии. Для обеспечения достаточной точности измерений принимались следующие меры, направленные на обеспечение пространственной равномерности возбуждения исследуемых образцов:

- образцы имели малую оптическую плотность;
- излучение лазера накачки имело высокую однородность по сечению пучка благодаря использованию диффузно-отражающего лампового осветителя;
- варьирование энергии, падающей на образцы, осуществлялось с помощью набора калиброванных нейтральных фильтров при фиксированной энергии накачки;
- на германиевый фотоприемник попадало излучение люминесценции лишь из центральной, наиболее равномерно возбуждаемой части накачиваемой зоны образца.

Плотность возбужденных ионов эрбия определялась по следующей методике. Поскольку при низких уровнях возбуждения зависимость интенсивности люминесценции от энергии накачки имеет линейный характер, концентрацию возбужденных ионов эрбия N^* можно определить следующим образом:

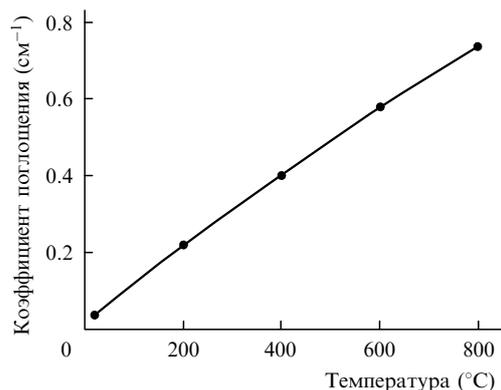


Рис. 2. Температурная зависимость коэффициента поглощения k на $\lambda = 1.055$ мкм в образце ИАГ: Er, Yb с концентрацией иттербия 1.38×10^{21} см $^{-3}$.

$$N^* = \frac{E_{\text{abs}} \eta}{SLhv},$$

где E_{abs} – поглощенная энергия; SL – объем накачиваемой области; S – сечение лазерного пучка накачки; L – толщина образца; hv – энергия фотона накачки; η – квантовая эффективность переноса энергии электронного возбуждения от иттербия к эрбию, которую при низких уровнях возбуждения можно представить как $\eta = 1 - \tau_{\text{Yb}}/\tau_{0\text{Yb}}$; τ_{Yb} и $\tau_{0\text{Yb}}$ – соответственно времена жизни иттербия при наличии и в отсутствие ионов эрбия в исследуемой среде.

Поглощенная энергия в образцах определялась, исходя из коэффициентов поглощения k , измеренных на $\lambda = 1.055$ мкм. Для фосфатного стекла с концентрациями ионов иттербия 4×10^{21} см $^{-3}$ и ионов эрбия 5×10^{19} см $^{-3}$ значение k составляло при комнатной температуре 0.13 см $^{-1}$, а для кристалла ИАГ: Yb, Er с концентрацией ионов иттербия 1.38×10^{21} см $^{-3}$ измеренная температурная зависимость коэффициента поглощения приведена на рис. 2. Наблюдаемая зависимость обусловлена уширением спектра поглощения иттербия с ростом температуры и имеет практически линейный характер. Результаты исследований накопления энергии на верхнем лазерном уровне ${}^4I_{13/2}$ иона Er $^{3+}$ в ИАГ в зависимости от температуры и энергии накачки показаны на рис. 3. Здесь же представлена соответствующая зависимость для фосфатного стекла при температуре $T = 20$ °C. По оси абсцисс отложена безразмерная энергия накачки (т. е. число поглощенных фотонов накачки, приходящихся на один ион эрбия) $\varepsilon = E_{\text{abs}}/(SLhvN)$ (где N – концентрация ионов эрбия в исследуемом образце), а по оси ординат – отношение $\beta = N^*/N$.

Из рис. 3 видно, что с ростом температуры от комнатной до 600 °C в кристалле ИАГ: Yb, Er наблюдается заметное увеличение эффективности сенсibilизации люминесценции ионов эрбия при накачке в полосу поглощения иттербия. Это объясняется, так же как и при низких уровнях возбуждения [2], уменьшением времени жизни состояния ${}^4I_{11/2}$ иона эрбия с ростом температуры. Наблюдаемое при $T > 600$ °C падение эффективности мы связываем с термическим заселением этого состояния с уровня ${}^4I_{13/2}$. Предельно достижимое значение β в кристалле ИАГ: Yb, Er оказывается при любых температурах существенно ниже, чем у фосфатного стекла. Из рис. 3 следует, что для достижения порога возникновения инверсии ($\beta \geq 0.5$) в кристалле ИАГ: Yb, Er требуется при-

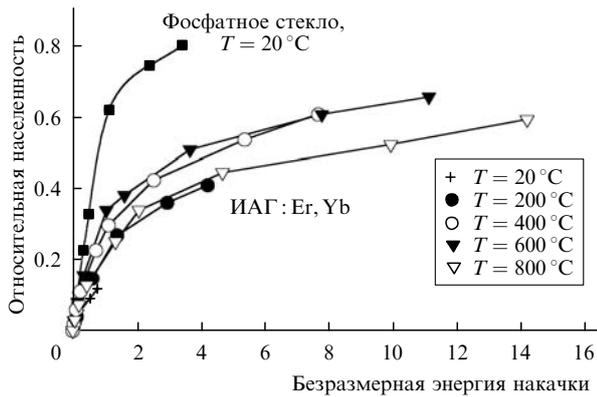


Рис. 3. Зависимости от безразмерной энергии накачки ϵ относительной населенности β уровня ${}^4I_{13/2}$ иона эрбия в фосфатном стекле при температуре $T = 20^\circ\text{C}$ и в кристалле ИАГ:0.5% Er, 10% Yb при $T = 20 - 800^\circ\text{C}$.

мерно в пять раз большая энергия накачки, чем при использовании фосфатного стекла. Максимальные значения β для ИАГ:Yb,Er, полученные в температурной области $400 - 600^\circ\text{C}$, составляют ~ 0.6 . Такое различие в поведении зависимостей $\beta(\epsilon)$ в стекле и кристалле ИАГ мы в первую очередь связываем с остающимся различием времен жизни τ состояния иона эрбия ${}^4I_{11/2}$ в стекле (1–2 мкс) и в ИАГ при $400 - 600^\circ\text{C}$ (6–8 мкс). Это, по-видимому, приводит к большему, по сравнению со стеклом, потерям эффективности возбуждений в ИАГ в системе $\text{Yb}^{3+} \rightarrow \text{Er}^{3+}$ за счет существующих процессов обратной передачи энергии $\text{Yb}^{3+} \leftarrow \text{Er}^{3+}$ и развивающихся при высоких уровнях накачки ап-конверсионных процессов.

Интересно отметить, что зависимости $\beta(\epsilon)$ для кристалла ИАГ:Yb,Er в диапазоне температур $400 - 600^\circ\text{C}$ оказались похожими на соответствующие зависимости, полученные в [4] для системы иттербий–эрбий в силикатном стекле при комнатной температуре. С учетом того, что времена жизни уровня ${}^4I_{11/2}$ иона Er^{3+} в том и другом случае близки (8–20 мкс в силикатных стеклах), такой результат представляется естественным.

В рамках настоящей работы нами была предпринята попытка получения генерации в ИАГ:Yb,Er на $\lambda = 1.54$ мкм при лазерной накачке. Описанный выше кристалл, имевший, к сожалению, не очень высокое оптическое качество, был использован для изготовления цилиндрического активного элемента диаметром 5 мм и длиной 30 мм. Активный элемент (без оптических покрытий на торцах) помещался в нагреваемую до 600°C керамическую трубку и продольно возбуждался уже упоминавшимся неодимовым стеклянным лазером. Резонатор длиной около 150 мм был образован вогнутыми (радиус кривизны 100 мм) зеркалами с коэффициентом отражения свыше 99.5% на $\lambda = 1.54$ мкм, находящимися вне нагреваемой трубки. В указанных условиях не удалось получить генерацию при плотности энергии накачки около 250 Дж/см^2 (при которой возникало лучевое повреждение кристалла на рассеивающих включениях), что соответствует, по данным рис.3, значению $\beta \approx 0.5 - 0.55$.

Таким образом, показано, что эффективность накопления энергии на уровне ${}^4I_{13/2}$ иона Er^{3+} в ИАГ:Yb,Er можно существенно увеличить при нагреве кристалла на несколько сотен градусов выше комнатной температуры. Найдена оптимальная область температур ($400 - 600^\circ\text{C}$), при которых до 60% ионов эрбия могут быть переведены в возбужденное состояние ${}^4I_{13/2}$ при накачке, идущей через ионы Yb^{3+} , что при условии оптимизации всех элементов лазера позволяет надеяться на реализацию трехуровневой схемы генерации на длине волны ~ 1.54 мкм.

Авторы благодарят Х.С.Багдасарова и его сотрудников за предоставление кристалла ИАГ:Yb,Er.

Настоящие исследования выполнены при поддержке РФФИ (гранты № 05-02-17502 и 06-02-08057-офи).

1. Schweizer T., Jensen T., Neumann E., Huber G. *Opt. Commun.*, **118**, 557 (1995).
2. Галаган Б.И., Денкер Б.И., Осико В.В., Сверчков С.Е. *Квантовая электроника*, **36**, 595 (2006).
3. Denker B., Galagan D., Osiko V., Sverchkov S. *Techn. Dig. Conf. ASSL'2001* (Seattle, USA 2001, p. 389).
4. Садовский П.И. *Канд. дис.* (М., МФТИ, ИРЭ, 1987).