

КРИСТАЛЛ $\text{CeF}_3:\text{Nd}^{3+}$ – ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ АКТИВНАЯ СРЕДА ДЛЯ ИК ЛАЗЕРОВ С ПОПЕРЕЧНОЙ НАКАЧКОЙ

Аглямов Р.Д., Морозов О.А., Наумов А.К.

*ФГАОУ ВПО Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д.18*

e-mail: uh4rad@rambler.ru

поступила в редакцию 05 ноября 2014 года

Аннотация

Получены данные поляризационных спектроскопических исследований кристалла $\text{CeF}_3:\text{Nd}^{3+}$. Рассчитаны коэффициенты ветвления люминесценции ионов Nd^{3+} с верхнего лазерного состояния – $^4\text{F}_{3/2}$ на состояния мультиплета $^4\text{I}_j$ в кристалле $\text{CeF}_3:\text{Nd}^{3+}$, которые определены впервые. Произведена оценка порога лазерной генерации на кристалле $\text{CeF}_3:\text{Nd}^{3+}$ при накачке лазерными диодами в различные штарковские состояния термов $^4\text{F}_{3/2}$ и $^2\text{H}_{9/2}$.

Ключевые слова: *оптический резонатор, лазерная физика, коэффициенты ветвления.*

Введение. Излучение твердотельных Nd лазеров с длиной волны генерации около 1 мкм в настоящее время широко используется в квантовой электронике. За более чем 50-летнюю историю существования таких лазеров, для них в совершенстве, промышленно отработана технология напыления отражающих покрытий резонаторных зеркал и просветляющих покрытий. Для использования этих лазеров в различных отраслях человеческой деятельности (науке технологии промышленности и т.д.), на настоящий момент, созданы и изготавливаются промышленным образом широкий спектр оптических устройств для преобразования их излучения, которое применяются в различных приборах и устройствах народного хозяйства.

Создание полупроводниковых лазерных диодов и дальнейшее их использование для накачки твердотельных активных сред (АС) лазеров сняло большинство проблем лазеров с ламповой накачкой, которая до этого широко использовалась. Лазеры с диодной накачкой, с выходной мощностью эквивалентной существующим лазерам с ламповой накачкой, имеют в 3-5 раз меньшие габариты и КПД, достигающий 50-70 %. К настоящему времени промышленность предлагает широкий ассортимент диодов как непрерывного, так и импульсного действия, которые способны полностью заменить ламповую накачку Nd-лазеров. Сейчас, например, существуют специально созданные для технологических нужд, Nd-лазеры с диодной накачкой с непрерывной выходной мощностью до 12 кВт.

Но, с появлением диодов для накачки, наряду с возросшими требованиями к АС Nd-лазеров, появились новые, которые стоят на пути создания ЛДН с выходной средней мощностью 100-500 Вт. Главная из которых – малые значения коэффициентов поглощения излучения накачки у широко используемых АС для Nd-лазеров. Эти малые значения коэффициентов поглощения обусловлены требованиями к концентрации активатора, при которой тушение его люминесценции минимально и, следовательно, минимально укорочение ее времени жизни, что полезно сказывается на накопительных свойствах АС. Все это определяет выбор в пользу продольного способа накачки активного элемента, который сейчас, в связи с вышесказанным, вынуждено широко используется. К главным недостаткам продольного способа накачки можно отнести неравномерность накачки АС по длине, а также высокую плотность излучения накачки на торце АС, через который она осуществляется. Последнее как раз и является ограничителем в наращивании выходной мощности ЛДН.

Для создания высокоэффективного ЛДН с поперечной накачкой становится крайне актуальным наличие АС с высоким коэффициентом поглощения и отсутствием тушения люминесценции активатора. Одной из описанных в литературе кристаллических Nd-активированных АС удовлетворяющей этим требованиям, на наш взгляд, является кристалл

$\text{CeF}_3:\text{Nd}^{3+}$. Этот кристалл был охарактеризован в 1968 году Каминским А.А. как перспективная лазерная АС для ламповой накачки. Судя по данным этой работы, нами было отмечено, что у ионов Nd^{3+} на лазерном переходе ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ практически не наблюдается тушения люминесценции при концентрации ионов в кристалле CeF_3 вплоть до 4 %.

Проведенные нами предварительные спектроскопические исследования абсорбционных свойств кристалла $\text{CeF}_3:\text{Nd}^{3+}$ в поляризованном свете, в области излучения современных широкодоступных диодных линеек, показали, что в обеих поляризациях у этого кристалла имеются полосы поглощения с максимальными значениями порядка 10 см^{-1} . Ширина этих полос поглощения при этом составляет около 10 нм, что хорошо согласуется с шириной линии лазерных диодов для накачки, обычная ширина которых составляет 3 нм. При этом сам кристалл CeF_3 обладает высоким оптическим качеством и отличной прозрачностью на длинах волн накачки и генерации, так как он сравнительно легко выращивается методом направленной кристаллизации (содержит малое количество дефектов).

Образцы для исследования. Образцы кристаллов $\text{CeF}_3:\text{Nd}^{3+}$ были выращены в лаборатории МРС и КЭ Казанского федерального университета методом направленной кристаллизации в графитовых тиглях во фторированной атмосфере аргона. Все исходные компоненты шихты имели чистоту порядка 99,99%. Активация кристалла CeF_3 осуществлялась внесением в шихту соединения NdF_3 в количестве 1 ат. %.

Выращенные образцы представляли собой булы длиной 15 мм и ~8 мм в диаметре. Оптические оси выращенных кристаллов были расположены в плоскости, перпендикулярной геометрической оси образцов. Для спектроскопических исследований от булы были отрезаны пластинки толщиной около 1 мм поперек оси кристалла, таким образом, чтобы оптическая ось в каждой пластинке располагалась в ее плоскости.

Коэффициенты ветвления энергии возбуждения с состояния ${}^4\text{F}_{3/2}$ ионов активатора в кристалле $\text{CeF}_3:\text{Nd}^{3+}$. Одними из важных спектроскопических характеристик Nd-активированных кристаллов, которые предполагается применять в качестве активной среды, являются коэффициенты ветвления (КВ) энергии возбуждения – переходами с состояния ${}^4\text{F}_{3/2}$ ионов Nd^{3+} на состояния мультиплета ${}^4\text{I}_j$ – которыми обусловлена люминесценция. По этим данным возможна оценка лазерного потенциала такой АС при переходе на то или иное состояние мультиплета: ${}^4\text{I}_{9/2}$, ${}^4\text{I}_{11/2}$, ${}^4\text{I}_{13/2}$ и ${}^4\text{I}_{15/2}$. По сути, каждый из коэффициентов ветвления – это квантовый выход люминесценции обусловленный соответствующим переходом. В свою очередь, по известному значению квантового выхода, наряду с люминесцентным временем жизни становится возможным определять излучательное время жизни соответствующего состояния, следовательно, и вероятность для данного перехода. Все эти параметры необходимы для определения сечения люминесцентных переходов. Знание величины поперечного сечения (или вероятности) люминесцентных переходов дает возможность рассчитывать ряд рабочих характеристик оптического квантового генератора, например, порог генерации, выходную мощность, оптимальное пропускание зеркал оптического резонатора и ряд других.

Определение КВ энергии возбуждения люминесценции с состояния ${}^4\text{F}_{3/2}$ ионов Nd^{3+} на состояния мультиплета ${}^4\text{I}_j$ в кристалле $\text{CeF}_3:\text{Nd}^{3+}$ осуществлялось методом сравнения с образцом для которого эти коэффициенты были известны. В наших экспериментах для этого использовался образец кристалла $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$. Для этой цели спектры люминесценции кристалла $\text{YAG}:\text{Nd}^{3+}$ и кристалла $\text{CeF}_3:\text{Nd}^{3+}$ регистрировались в одинаковых условиях в диапазоне от 800 до 1400 нм. Затем с использованием значений интегралов, вычисленных из спектров люминесценции, обусловленных соответствующими переходами для обоих образцов, с использованием данных коэффициентов ветвления, для кристалла с известными коэффициентами, определялись КВ для неизвестного.

В таблице 1 приведены данные по КВ люминесценции, при возбуждении в состоянии ${}^4\text{F}_{3/2}$ ионов Nd^{3+} в образце кристалла YAG . В первой строке таблицы приводятся данные по КВ заимствованные из литературы. Во второй строке – данные, определенные из спектра

люминесценции, зарегистрированного на установке, описанной в этой работе. В третьей строке - коэффициенты, показывающие во сколько раз полученные из экспериментов коэффициенты ветвления, отличаются от истинных значений.

Таблица 1. Коэффициенты ветвления энергии возбуждения из состояния ${}^4F_{3/2}$ ионов Nd^{3+} в образце кристалла YAG.

№ п/п	Название парам.	$\beta_1 [{}^4I_{9/2}]$	$\beta_2 [{}^4I_{11/2}]$	$\beta_3 [{}^4I_{13/2}]$	Условие регистрации
1	Данные из литературы [1]	0,28	0,60	0,12	300 К
2	Экспериментальные данные	0,34	0,58	0,08	300 К
3	Поправочные коэффициенты Спектроскопич. установки	0,82	1,03	1,5	300 К

В таблице 2 приведены результаты определения КВ люминесценции для каждого из термов мультиплета 4I_j в кристалле CeF_3 , активированного ионами Nd^{3+} для обеих поляризаций. Данные получены из спектров люминесценции, записанных при температуре 300К.

Таблица 2. Коэффициенты ветвления энергии возбуждения из состояния ${}^4F_{3/2}$ ионов Nd^{3+} в образцах кристаллов $CeF_3:Nd^{3+}$.

№ п/п	Кристалл {поляризация}	$\beta_1 [{}^4I_{9/2}]$	$\beta_2 [{}^4I_{11/2}]$	$\beta_3 [{}^4I_{13/2}]$	Условие регистрации
1.	$CeF_3:Nd^{3+} \{ \pi \}$	0,39	0,53	0,08	300 К
2.	$CeF_3:Nd^{3+} \{ \sigma \}$	0,38	0,53	0,09	300 К

Из таблицы видно, что энергия возбуждения делится преимущественно между состояниями ${}^4I_{9/2}$ и ${}^4I_{11/2}$, причем переходы на последнее состояние имеет самое высокое значение для обеих поляризаций. Следует обратить внимание на коэффициент β_3 для кристалла $CeF_3:Nd^{3+}$, который более чем на 30% ниже по сравнению с кристаллом граната $YAG:Nd^{3+}$.

На основе полученных и имеющихся в литературе спектроскопических данных стало возможным произвести оценку порога лазерной генерации, которого возможно достичь на имеющихся у нас образцах.

Оценка порога лазерной генерации по люминесценции. Оценку порога лазерной генерации на образце кристалла для которого были проведены исследования спектроскопических свойств, для режима импульсного монохроматического возбуждения на переходе, соответствующем самой интенсивной спектральной линии в области спектра 1 мкм, на основе полученных спектроскопических данных можно сделать по формуле, предложенной в работе [2] Янга и Делюка:

$$E_{II} = \frac{8\pi\tau\nu_0^2}{c^3 g(\nu)\tau_p} \cdot \frac{h\nu_n}{\eta} \quad (1)$$

где: τ – время жизни уровня ${}^4F_{3/2}$ иона Nd^{3+} ; ν_0 – частота излучения максимума самой интенсивной линии люминесценции; $h\nu_n$ – энергия кванта накачки; c – скорость света; η – квантовый выход люминесценции; τ_p – время жизни генерируемых фотонов в резонаторе; $g(\nu)$ – формфактор соответствующей линии люминесценции, который, соответственно, для Лоренцевого и Гауссового профилей спектральных линий определяется выражениями:

$$g(\nu) = \frac{2}{\pi \cdot \Delta\nu} \quad (2)$$

и

$$g(\nu) = \frac{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot \ln 2}}{\pi \cdot \Delta\nu}, \quad (3)$$

где: Δv – полуширина линии люминесценции самой интенсивной линии. Величина τ_p определяется следующим выражением:

$$\tau_p = 2 \cdot \frac{L}{c} \cdot (-\log(R1 \cdot R2) + 2 \cdot \delta \cdot l)^{-1} \quad (4)$$

где δ – коэффициент неактивных потерь активной среды; c – скорость света; l – длина активной среды; L – длина резонатора.

Для нашего случая для исследованных кристаллов профили спектральных линий при комнатной температуре с достаточной достоверностью описываются функцией Лоренца, поэтому при расчетах порога генерации использовались выражения (1) и (2).

Формула (1) определяет пороговую энергию, поглощенную активной средой, и не учитывает узкую направленность генерируемого излучения, эффективность накачки и возможные неактивные потери в накачиваемой среде и т.д. Здесь же надо отметить, что выражение (4) было выведено из условия генерации бесконечно узкой лазерной линии, но на практике это не всегда выполняется.

Вычисленные по выражению (1) удельные пороговые значения энергии генерации для кристалла $CeF_3:Nd^{3+}$ при подстановке соответствующих значений приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Удельные пороговые значения энергии генерации при накачке на состояния ${}^4F_{3/2}$ и ${}^2H_{9/2}$ в образцах кристаллов $CeF_3:Nd^{3+}$ для различных уровней легирования ионов Nd^{3+} и для различных ориентаций возбуждения.

Уровень легирования	Накачиваемый терм	Длина волны штарка терма накачки, нм	$E_p[\pi]$, мДж/см ³	$E_p[\sigma]$, мДж/см ³
1%	${}^4F_{3/2}$	860	0.964	0.973
	${}^2H_{9/2}$	802	1.055	1.06
4%	${}^4F_{3/2}$	860	1.136	0.840
	${}^2H_{9/2}$	802	1.217	0.902

Все вычисления производились из предположения, что накачка на состояния ${}^4F_{3/2}$ и ${}^2H_{9/2}$ осуществляется с помощью излучения лазерных диодов с длинами волн 860 нм и 802 нм соответственно и излучение поглощается полностью. Время жизни ионов Nd^{3+} на состоянии ${}^4F_{3/2}$ равно $\tau=280$ мкс [3].

Из таблицы видно, что возможные значения пороговой энергии генерации при концентрации активатора 1 ат. % для обеих поляризаций не сильно отличаются друг от друга, чего нельзя сказать про результаты подобных расчетов при более высоком уровне легирования. При σ – поляризованной накачке пороговые значения энергии генерации много ниже, чем π – поляризации. Отсюда следует вывод, что при использовании данного кристалла в качестве активной среды накачку кристалла $CeF_3:Nd^{3+}$ предпочтительнее осуществить в σ – поляризации. Данные значения получены для идеализированного случая, т.е. как говорилось ранее, без учета неактивных потерь. Выражение (4) было выведено из условия генерации бесконечно узкой лазерной линии, что на практике не всегда выполняется. Но, если даже учитывать то, что при реальных условиях значения пороговой энергии генерации увеличатся в несколько раз, они не выходят за границы пределов, достижимых ламповыми и лазерными источниками накачки. Поэтому следует ожидать сравнительно легкое достижение порога лазерной генерации на этом кристалле.

Заключение. В результате выполненной работы получены новые данные поляризационных спектроскопических исследований кристалла $CeF_3:Nd^{3+}$. Полученные данные будут полезны для исследований лазерных свойств этого кристалла и создания на его основе активного элемента для лазера с поперечной диодной накачкой. При выполнении работы были получены коэффициенты ветвления люминесценции ионов Nd^{3+} с верхнего лазерного состояния – ${}^4F_{3/2}$ на состояния мультиплета 4I_j в кристалле $CeF_3:Nd^{3+}$, которые определены впервые. А так же по полученным данным спектроскопических исследований

была произведена оценка порога лазерной генерации на кристалле $\text{CeF}_3:\text{Nd}^{3+}$ при накачке лазерными диодами в различные штарковские состояния термов $^4\text{F}_{3/2}$ и $^2\text{H}_{9/2}$.

Благодарность. Работа выполнена в рамках «Программы развития деятельности студенческих объединений КФУ» (0613/06.13.02292.005).

Список литературы

- 1) Каминский А.А. Лазерные кристаллы. М.: Наука. 1975. 256 с.
- 2) Yang K.H., Deluca J.A. VUV fluorescence of Nd^{3+} , Er^{3+} and Tm^{3+} - doped trifluorides and tunable coherent sources from 1650 to 2600 Å // Applied Physics Letters. 1976. V.29. P.499-501.
- 3) Connor J.R., Hargreaves W.A. Lattice energy transfer and stimulated emission from $\text{CeF}_3:\text{Nd}^{3+}$ // Applied Physics Letters. 1964. V.4. P.208-209.