

Некритичный к температурному дрейфу длины волны излучения диода накачки лазер на кристалле $\text{NaLa}(\text{MoO}_4)_2 : \text{Nd}$, работающий в непрерывном режиме или режиме модуляции добротности

С.Н.Ушаков, В.А.Романюк, П.А.Рябочкина, И.А.Шестакова,
Д.А.Лис, К.А.Субботин, А.В.Шестаков, Е.В.Жариков

Получена лазерная генерация на кристаллах $\text{NaLa}(\text{MoO}_4)_2 : \text{Nd}$ без стабилизации длины волны излучения диодной накачки. Найдена зависимость мощности генерации лазера в непрерывном режиме (на длине волны 1059 нм) от температуры диода накачки (в диапазоне 10–45 °С). Показано, что при изменении температуры диода в указанном диапазоне эффективность генерации меняется не более чем на 30%. В режиме пассивной модуляции добротности резонатора эксперименты проводились для двух режимов накачки – импульсного и непрерывного. При импульсной накачке энергия импульса генерации составила 16 мкДж при длительности импульса генерации 11 нс. Генерация происходила на длине волны 1059 нм, так же как и в случае непрерывного режима генерации. При непрерывной накачке мощностью 1.5 Вт была получена генерация с энергией импульса 11 мкДж.

Ключевые слова: кристалл $\text{NaLa}(\text{MoO}_4)_2 : \text{Nd}$, лазерная генерация в непрерывном или импульсном режиме, температурный дрейф длины волны.

1. Введение

Значительные успехи, достигнутые в последнее время в производстве полупроводниковых лазеров и лазерных линеек, работающих в области $\lambda = 810$ нм, привели к созданию твердотельных лазеров на основе Nd-содержащих кристаллов (YAG, YAP, YLF и др). Такие лазеры отличаются компактностью, простотой конструкции и высокой эффективностью, что обусловлено хорошим согласованием спектра генерации лазерных диодов (ЛД) с полосой поглощения ионов Nd^{3+} . Однако малая ширина линий поглощения ионов Nd^{3+} в этих кристаллах при существенной зависимости спектра генерации ЛД от температуры приводит к повышению требований к термостабилизации источников накачки (в частности, для этого используются элементы Пельтье, что резко увеличивает размеры, сложность конструкции и энергопотребление лазерных систем) и к затруднению при использовании таких лазеров в сложных климатических условиях (при изменениях температуры окружающей среды в широких пределах).

Возможные пути устранения этих недостатков связаны либо с одновременным использованием нескольких

ЛД, длины волн генерации которых смещены относительно друг друга на 1.5–2 нм, либо с использованием в качестве активных сред кристаллов с широкой полосой поглощения, для которых температурный дрейф длины волны накачки не был бы столь критичным. Одним из таких кристаллов является $\text{NaLa}(\text{MoO}_4)_2 : \text{Nd}^{3+}$ (МЛН : Nd).

Первые работы по исследованию спектрально-люминесцентных и генерационных характеристик кристаллов МЛН : Nd в условиях ламповой накачки появились в 1960-х годах [1–3]. Однако из-за сравнительно невысоких термомеханических параметров кристалла (теплопроводность $2.3 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, твердость по Моосу ~ 4 [2]) широкого применения в лазерах с ламповой накачкой он не получил. Использование диодной накачки позволяет существенно снизить тепловые нагрузки на активный элемент и требования к его термомеханическим характеристикам. Первые генерационные эксперименты, проведенные нами с использованием кристалла МЛН, легированного ионами Nd^{3+} с концентрацией 3.8 ат.%, при продольной диодной накачке на различных длинах волн, описаны в [4]. Дальнейшее исследование оптических и спектрально-люминесцентных свойств кристалла МЛН : Nd с целью оптимизации концентрации ионов неодима в нем и конфигурации активного элемента, а также проведение генерационных экспериментов в различных режимах являются актуальными и представляют практический интерес.

2. Структура кристалла и его оптические и спектрально-люминесцентные свойства

Кристалл $\text{NaLa}(\text{MoO}_4)_2 : \text{Nd}^{3+}$ относится к структурному типу шеелита (CaWO_4) (параметры элементарной ячейки $a = 5.344 \text{ \AA}$, $c = 11.730 \text{ \AA}$, пространственная группа $\text{C}_{4h}^6 - \text{I}4_1\bar{a}$, плотность 4.8 г/см^3 , плавится конгруэнтно

С.Н.Ушаков, Д.А.Лис, К.А.Субботин. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: lisdensis@lsk.gpi.ru

В.А.Романюк, А.В.Шестаков. ООО «НПЦ ЭЛС-94», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3

П.А.Рябочкина. Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Россия, 430005 Саранск, ул. Большевикская, 68

И.А.Шестакова. ФГУП «НИИ "Полус" им. М.Ф.Степеляха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3

Е.В.Жариков. Российский химико-технологический университет им. Д.И.Менделеева, Россия, 125047 Москва, Миусская пл., 9

Поступила в редакцию 11 марта 2010 г.

при температуре 1140 °С [5]). Ионы молибдена в этом кристалле расположены в центре кислородных тетраэдров. Катионы Na^+ и La^{3+} располагаются между тетраэдрами вдоль кристаллографической оси 4-го порядка кристалла, причем их распределение по кристаллографическим позициям имеет почти строго статистический характер [6]. Таким образом, ионы Nd^{3+} , замещающие ионы La^{3+} , испытывают влияние бесконечно большого набора кристаллических полей, бесконечно мало отличающихся друг от друга. Вследствие этого линии в спектрах поглощения и люминесценции ионов Nd^{3+} в данных кристаллах испытывают существенное неоднородное уширение.

Для проведения спектроскопических исследований, определения оптических констант и выполнения генерационных экспериментов методом Чохральского были выращены кристаллы МЛН: Nd с концентрацией ионов неодима $C_{\text{Nd}} = 0.2, 2$ и 3.8 ат.%. Кристаллы выращивались на установке «Кристалл-2» из иридиевого тигля в атмосфере N_2 с примесью O_2 с концентрацией 1 % при скорости вытягивания 0.7 мм/ч (на номинальной стадии). Монокристаллическая затравка вырезана перпендикулярно оси 4-го порядка. Концентрации ионов Nd^{3+} в выращенных кристаллах, измеренные методом рентгено-спектрального микроанализа, оказались практически равными их концентрациям в шихте, т.е. коэффициент распределения в данном случае практически равен единице.

На рис.1 приведены спектры поглощения кристалла МЛН: Nd с концентрацией $C_{\text{Nd}} = 0.2$ ат.%, зарегистрированные при температуре $T = 300$ К для π - и σ -поляризации. Спектры соответствуют переходу с уровней основного мультиплета $^4\text{I}_{9/2}$ ионов Nd^{3+} на уровни мультиплетов $^4\text{F}_{5/2}$ и $^2\text{H}_{9/2}$.

На рис.2 представлена зависимость интегрального (эффективного) коэффициента поглощения кристаллом МЛН: Nd ($C_{\text{Nd}} = 2$ ат.%) излучения диодной накачки от температуры ЛД. Измерения проводились для неполяризованной накачки. Видно, что коэффициенты поглощения свыше 5 см^{-1} , при которых активный элемент длиной 5 мм поглощает более 80 % падающего излучения накачки, достигаются при температуре ЛД от 11 до 40 °С. Это означает, что температура ЛД может варьироваться в диапазоне ± 15 °С и более без существенного изменения эффективности накачки активной среды.

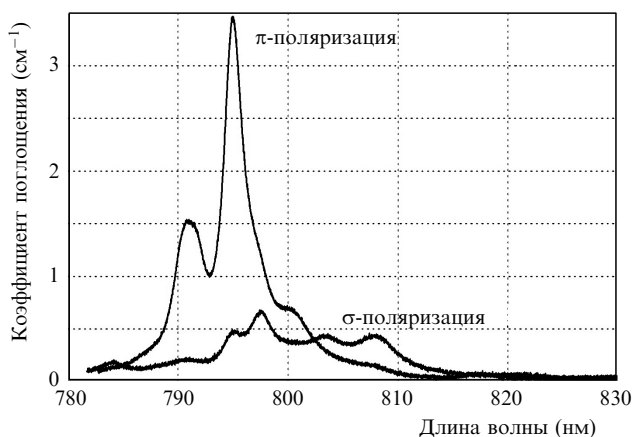


Рис.1. Спектры поглощения монокристалла МЛН: Nd ($C_{\text{Nd}} = 0.2$ ат.%) в области длин волн накачки ЛД для двух ортогональных поляризации.

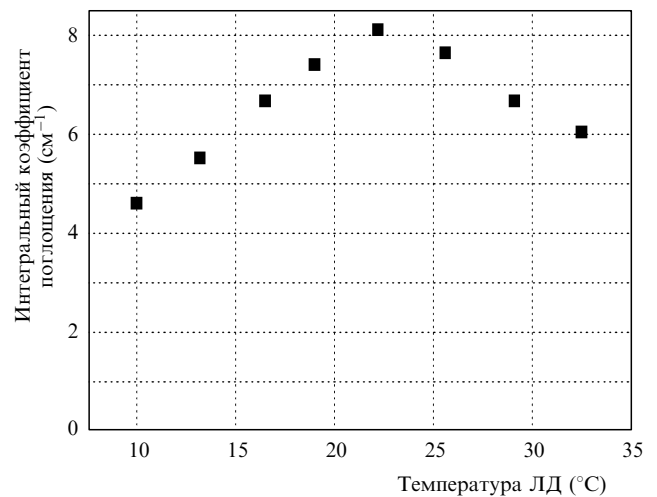


Рис.2. Зависимость интегрального (эффективного) коэффициента поглощения кристаллом МЛН: Nd ($C_{\text{Nd}} = 2$ ат.%) излучения AlGaAs-ЛД мощностью 1.5 Вт от температуры ЛД.

При этом в активном элементе с концентрацией ионов неодима 3.8 ат. % основная часть излучения накачки (более 50 %) поглощается в слое активной среды толщиной 1 мм. В то же время при меньшей концентрации активатора излучение накачки поглощается более равномерно по длине активного элемента, что существенно снижает тепловую нагрузку на него.

Для определения времени жизни верхнего лазерного уровня $^4\text{F}_{3/2}$ ионов Nd^{3+} , а также оценки влияния эффекта концентрационного тушения люминесценции была исследована кинетика затухания люминесценции с уровня $^4\text{F}_{3/2}$ ионов Nd^{3+} в исследуемых кристаллах. Кривые затухания люминесценции для кристаллов с концентрацией активатора 2 и 3.8 ат. % приведены на рис.3. По результатам наших измерений время жизни уровня $^4\text{F}_{3/2}$ ионов Nd^{3+} составляет 220 мкс при концентрации $C_{\text{Nd}} = 2$ ат. % и 130 мкс при $C_{\text{Nd}} = 3.8$ ат. %, т.е. при повышении концентрации иона активатора в 1.9 раза время жизни верхнего лазерного уровня уменьшалось более чем на 90 мкс (на 41 %). При этом появляется заметное отличие кинетики затухания от экспоненциальной. Все это свидетельствует о наличии концентрационного тушения в кристаллах МЛН при $C_{\text{Nd}} = 3.8$ ат. %, которое заметно уменьшает квантовый выход люминес-

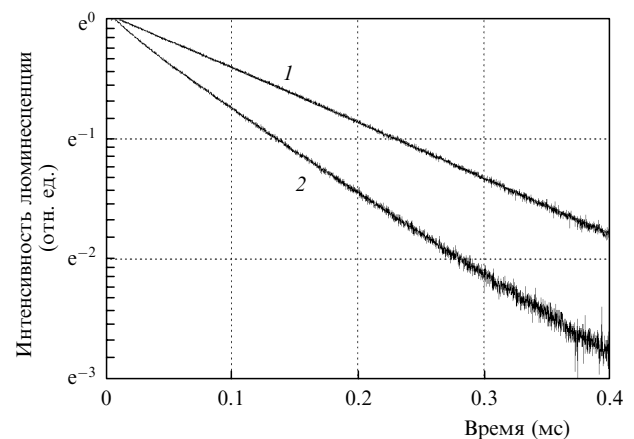


Рис.3. Кинетика затухания люминесценции с уровня $^4\text{F}_{3/2}$ в монокристаллах МЛН: Nd с концентрациями неодима 2 (1) и 3.8 ат. % (2) при температуре 300 К.

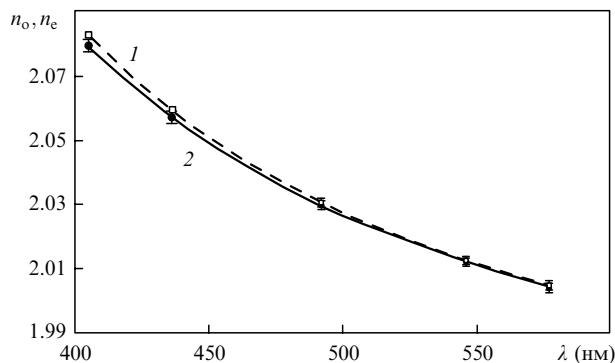


Рис.4. Дисперсия показателей преломления n_o (1) и n_e (2) монокристаллов МЛН : Nd в видимой области.

ценции с уровня $^4F_{3/2}$. В работе [7] отмечается, что при увеличении концентрации неодима от 1 % до 4 % квантовый выход люминесценции МЛН : Nd уменьшается в два раза. Кроме того, уменьшение времени жизни верхнего лазерного уровня препятствует, при прочих равных условиях, накоплению инверсии населенности, что приводит к увеличению порога генерации, а также к уменьшению энергии импульса при работе в режиме пассивной модуляции добротности резонатора.

Таким образом, на основании проведенных исследований, можно сделать вывод о том, что более перспективным с точки зрения реализации продольной диодной накачки является кристалл с концентрацией ионов неодима 2 ат. %.

Несмотря на то что исследования кристалла МЛН : Nd ведутся достаточно давно, в литературе содержится очень мало данных о его оптических характеристиках.

Для определения дисперсии показателей преломления кристалла МЛН : Nd ($C_{\text{Nd}} = 0.2$ ат. %) из него вырезалась призма с углом между полированными гранями 25° . При этом оптическая ось кристалла была перпендикулярна основанию призмы. Показатели преломления обыкновенной (n_o) и необыкновенной (n_e) волн в кристалле измерялись с помощью призмы и гониометра ГС-5 для длин волн из спектра излучения ртутной лампы. Дисперсионные зависимости $n_o(\lambda)$ и $n_e(\lambda)$ приведены на рис.4. Исследования показали, что в видимой области спектра дисперсия имеет нормальный характер и для ее описания можно воспользоваться приближенным соотношением Селлмейера:

$$n^2(\lambda) = 1 + \frac{S\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2}. \quad (1)$$

Полученные в соответствии с формулой (1) зависимости в координатах $1/\lambda^2, 1/(n^2 - 1)$ позволили определить константы $A = 1/S$ и $B = \lambda_0^2/S$ для обыкновенной ($A = 0.36, B = -9.88 \times 10^{-3} \text{ нм}^2$) и необыкновенной ($A = 0.36, B = -9.56 \times 10^{-3} \text{ нм}^2$) волн. Используя эти константы и исходя из предположения о справедливости приближения Селлмейера и для более длинноволнового диапазона, мы рассчитали показатели преломления для длины волны генерации 1059 нм: $n_o = 1.958$ и $n_e = 1.959$.

3. Результаты генерационных экспериментов

3.1. Непрерывный режим

В генерационных экспериментах использовались кристаллы размером $3 \times 3 \times 5$ мм, на оба торца которых бы-

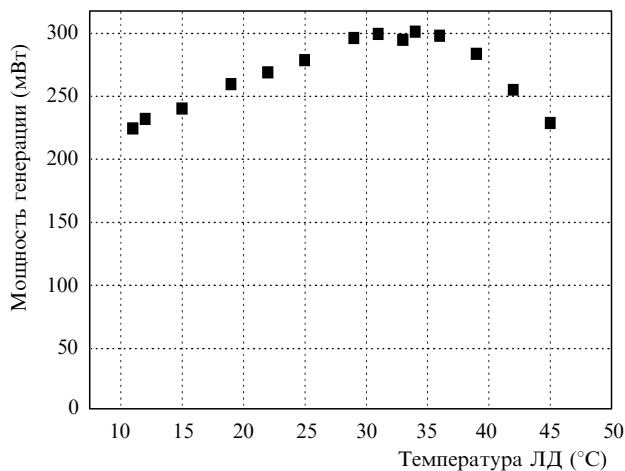


Рис.5. Мощность генерации непрерывного лазера на кристалле МЛН : Nd ($C_{\text{Nd}} = 2$ ат. %) на длине волны 1059 нм в зависимости от температуры диода накачки.

ли нанесены антиотражающие покрытия для длин волн 808 и 1064 нм. Накачка осуществлялась AlGaAs-ЛД с мощностью излучения 1.5 Вт, работающим в непрерывном режиме, а также в импульсном режиме с частотой следования импульсов 500 Гц. Излучение накачки попадало в активный элемент через плоское глухое зеркало резонатора и фокусировалось в пятно диаметром ~ 300 мкм внутри активного элемента на расстоянии ~ 1 мм от входного торца. Выходное зеркало было сферическим (радиус кривизны 120 мм), что обеспечивало устойчивость резонатора. Исследовалась зависимость генерационных характеристик лазера от температуры ЛД. Для этого диод был установлен на элементе Пельтье и его температура контролировалась с помощью терморезистора. Изменением тока, протекающего через элемент Пельтье, обеспечивалось изменение температуры ЛД от 10 до 45°C . На рис.5 приведена зависимость мощности генерации лазера при пропускании выходного зеркала 5 % от температуры диода накачки, работающего в непрерывном режиме. Видно, что при изменении температуры ЛД в указанном диапазоне эффективность генерации меняется не более чем на 30 %.

При отсутствии в резонаторе селективирующих элементов генерация происходит на длине волны 1059 нм. Навязыванием излучению в резонаторе ортогональной поляризации (путем введения в него поляризующих элементов) получена генерация на длине волны 1065 нм.

3.2. Режим пассивной модуляции добротности

В рамках настоящей работы были также проведены генерационные эксперименты с использованием кристалла МЛН с концентрацией ионов неодима 2 ат. % в режиме пассивной модуляции добротности резонатора. Применялся фототропный затвор на кристалле $\text{YAG} : \text{Cr}^{4+}$ с начальным пропусканием 92 %. Выходное зеркало резонатора имело коэффициент отражения 94.4 %. Эксперименты проводились для двух режимов накачки – импульсного и непрерывного.

Импульсная накачка осуществлялась с частотой следования импульсов 500 Гц, а длительность импульса накачки (180 мкс) была подобрана такой, чтобы в конце его высвечивался один импульс генерации. Энергия импульса генерации составила 16 мкДж при его длительности 11 нс и длине резонатора 30 мм. Генерация происхо-

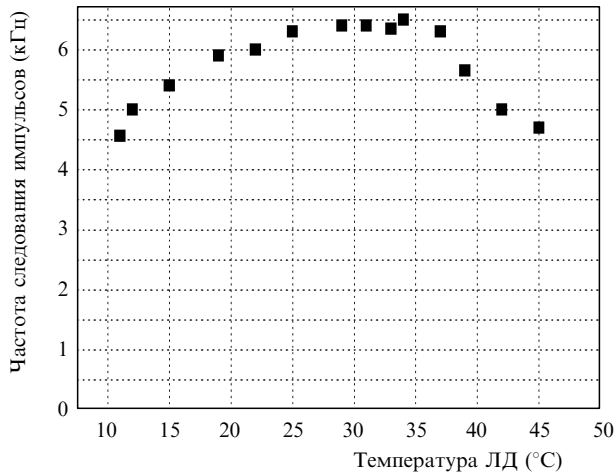


Рис. 6. Частота следования импульсов лазера на кристалле МЛН : Nd ($C_{Nd} = 2$ ат.%), работающего в режиме пассивной модуляции добротности с затвором на YAG:Cr⁴⁺, в зависимости от температуры диода накачки (длина волны генерации 1059 нм).

дила на длине волны 1059 нм, так же как и в случае непрерывного режима генерации.

При непрерывной накачке мощностью 1.5 Вт была получена генерация с энергией импульса 11 мкДж. Зависимость частоты следования импульсов генерации от температуры диодной накачки представлена на рис. 6. Видно, что в рассматриваемом температурном диапа-

зоне изменение частоты следования импульсов составляет достаточно небольшую величину – около 36 %.

4. Заключение

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что разупорядоченный шеелитоподобный кристалл NaLa(MoO₄)₂:Nd³⁺ достаточно перспективен для применения в твердотельных лазерах с диодной накачкой, работающих в условиях, затрудняющих точную стабилизацию длины волны ЛД. В частности, речь идет о приборах, используемых в полевых условиях, где, с одной стороны, возможны значительные климатические колебания температуры, а с другой – питание прибора осуществляется от автономных источников и его энергопотребление является ключевым параметром.

1. Морозов А.А., Толстой М.Н., Феофилов П.П., Шаповалов В.Н. *Оптика и спектроскопия*, **22** (3), 414 (1967).
2. Зверев Г.М., Колодный Г.Я. *ЖЭТФ*, **52** (2), 337 (1967).
3. Каминский А.А., Колодный Г.Я., Сергеева Н.И. *ЖПС*, **9** (5), 884 (1968).
4. Жариков Е.В., Лис Д.А., Онищенко А.М., Романюк В.А., Субботин К.А., Ушаков С.Н., Шестаков А.В. *Квантовая электроника*, **36** (1), 39 (2006).
5. Мохосоев М.В., Гетман Е.И. *Журнал неорганической химии*, **14** (9), 2351 (1969).
6. Kuz'micheva G.M., Lis D.A., Subbotin K.A., Rybakov V.B., Zhari- kov E.V. *J. Cryst. Growth*, **275**, e1835 (2005).
7. Зверев Г.М., Колодный Г.Я. *ЖЭТФ*, **52**, 337 (1967).