

## Коротковолновый ( $\lambda = 914$ нм) микролазер на кристалле $YVO_4:Nd^{3+}$

В.А.Сычугов, В.А.Михайлов, В.А.Кондратюк, Н.М.Лындин, Ю.Фрам, А.И.Загуменный, Ю.Д.Заварцев, П.А.Студеникин

*Определены условия, при которых реализуется генерация излучения с  $\lambda = 914$  нм в кристалле  $YVO_4:Nd^{3+}$  при его диодной накачке. Продемонстрирована возможность внутррезонаторного удвоения частоты излучения микролазера с использованием кристаллов  $LiIO_3$ .*

**Ключевые слова:** микролазер, полупроводниковая накачка, генерация гармоник.

Кристаллы  $YVO_4:Nd^{3+}$  в настоящее время широко используются в лазерах с диодной накачкой, в том числе и при удвоении частоты излучения ( $\lambda = 530$  нм) [1]. Достаточно широкая линия поглощения ионов  $Nd^{3+}$  ( $\lambda = 808$  нм), возможность варьирования концентрации ионов  $Nd^{3+}$  в широких пределах, а также большое сечение лазерного перехода с  $\lambda = 1064$  нм делают этот материал весьма привлекательным для лазеров с диодной накачкой. Использование тонких образцов  $YVO_4:Nd^{3+}$  (длиной  $\sim 1$  мм) позволяет реализовать зеленый лазер с диодной накачкой с выходной мощностью в несколько ватт [2].

В последнее время появились рекламные сообщения об использовании кристаллов  $YVO_4:Nd^{3+}$  в лазерах с длиной волны излучения в синей области спектра ( $\lambda = 457$  нм). Однако научные публикации о генерации излучения с  $\lambda = 914$  нм на лазерном переходе неодима  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$  в этом кристалле при диодной накачке, а также с удвоенной частотой, нам найти не удалось. Цель настоящей работы – устранение этого пробела.

В нашей работе были использованы кристаллы  $YVO_4:Nd^{3+}$  (с атомной концентрацией ионов  $Nd^{3+}$   $C = 1\%$ ) длиной 0.5 мм и диаметром 4 мм. Оптическая схема накачки и самого лазера представлена на рис.1. Для создания инверсной населенности уровней применялась система диодной накачки (производство фирмы «APhS GmbH»), которая имеет волоконный выход (диаметр сердцевинки 100 мкм, числовая апертура 0.22) и мощность излучения с  $\lambda = 808$  нм до 2.5 Вт. Для фокусировки накачки использовался трехлинзовый объектив, трансформирующий изображение торца волокна в пятно накачки диаметром 60 мкм. Такой диаметр пятна накачки оказался оптимальным в условиях наших экспериментов и позволял достичь примерно двукратного превышения мощности порога генерации.

Следует напомнить, что генерация излучения с  $\lambda = 914$  нм происходит, по сути дела, по трехуровневой схеме. Как известно, нижний лазерный уровень в кристалле  $YVO_4:Nd^{3+}$  удален от основного состояния всего лишь на  $433\text{ см}^{-1}$  и при комнатной (а тем более при рабочей) температуре сильно заселен. В связи с этим для создания

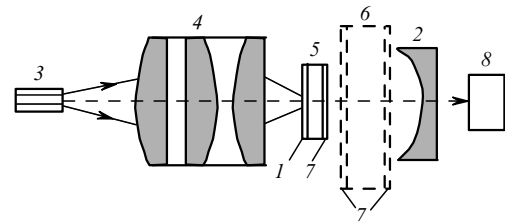


Рис.1. Схема микролазера с диодной накачкой и внутррезонаторным удвоителем частоты излучения:

1, 2 – зеркала резонатора; 3 – волоконный выход системы накачки; 4 – объектив; 5 – активный элемент ( $YVO_4:Nd$ ); 6 – нелинейный элемент ( $LiIO_3$ ); 7 – просветляющие покрытия; 8 – фотоприемник.

инверсной населенности на лазерном переходе необходимо, чтобы большое число ионов неодима находилось в возбужденном состоянии. Чтобы избежать поглощения на лазерном переходе такое состояние ионов нужно поддерживать по всей длине лазерного кристалла. Последнее обстоятельство означает, что интенсивность накачки на выходном торце кристалла должна составлять значительную долю от интенсивности накачки на входном торце.

Для повышения эффективности использования диодной накачки на выходной торец кристалла наносилось диэлектрическое зеркало, полностью отражающее излучение накачки и пропускающее излучение с  $\lambda = 914, 1064$  и  $1340$  нм. Изготовление такого диэлектрического зеркала является достаточно стандартной технологической процедурой, чего нельзя сказать об изготовлении диэлектрического зеркала на входном торце кристалла. Малая разность длин волн генерации лазера и накачки ( $\Delta\lambda \sim 100$  нм) делает процедуру синтеза многослойной диэлектрической структуры непростой задачей.

Нам удалось решить эту задачу с использованием специальной компьютерной программы, способной оптимизировать структуру с большим числом слоев ( $N \sim 40$ ) с переменными параметрами [3]. Результаты такой оптимизации представлены на рис.2. На рис.2,а показано изменение оптической толщины слоя в зависимости от его номера в структуре, а на рис.2,б – спектральная характеристика этой структуры. Видно, что наибольшие изменения оптическая толщина слоя претерпевает (для достижения нужного результата) в начале и в конце напылительного процесса, который был проведен на уста-

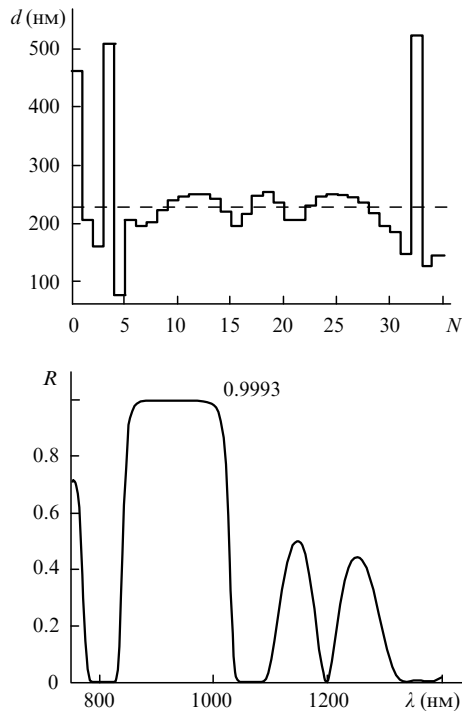


Рис.2. Зависимость оптической толщины диэлектрического слоя  $d$  на зеркале  $l$  от номера слоя  $N$  (четные номера слоев соответствуют слою  $\text{SiO}_2$ , нечетные – слою  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ) (а) и спектральная зависимость коэффициента отражения зеркала  $l$  (б); штриховая линия соответствует изменению толщины слоев диэлектрического зеркала.

новках «Бальцерс» с компьютерным управлением процессом напыления. Следует отметить, что изготовленное по нашей программе зеркало обеспечивает низкий коэффициент отражения ( $R < 1\%$ ) излучения с  $\lambda = 1064$  и  $1340$  нм, что необходимо для исключения генерации на этих длинах волн.

В экспериментах по генерации излучения с  $\lambda = 914$  нм использовалось внешнее выходное зеркало (плоское или сферическое с радиусом кривизны  $r = 15$  мм). Коэффициент отражения зеркала  $R = 97.5$  или  $100\%$  в экспериментах по удвоению частоты излучения.

Прежде всего была получена зависимость интенсивности выходного излучения лазера от длины его резонатора при заданной мощности накачки (рис.3). В качестве выходного зеркала применялось плоское зеркало с  $R = 97.5\%$ . С ростом длины резонатора наблюдается довольно резкий спад интенсивности, что свидетельствует о сильном влиянии термолинзы, индуцируемой накачкой

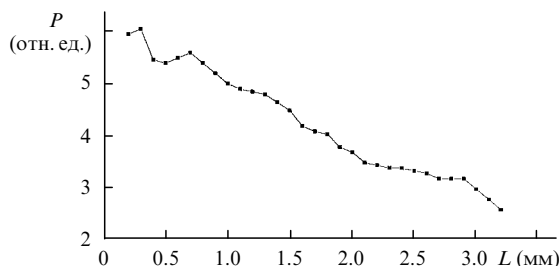


Рис.3. Зависимость выходной мощности  $P$  микролазера ( $\lambda = 914$  нм) от длины резонатора  $L$  при мощности накачки, вдвое превышающей пороговую мощность.

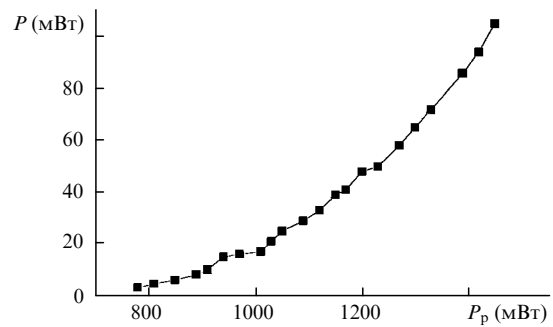


Рис.4. Зависимость выходной мощности  $P$  микролазера ( $\lambda = 914$  нм) от мощности накачки  $P_p$  при минимальной длине резонатора и коэффициенте отражения выходного зеркала  $R = 97.5\%$ .

в активном элементе. Устойчивую генерацию излучения с  $\lambda = 914$  нм удается поддерживать при длине резонатора до  $3-4$  мм. Несколько большую длину резонатора, необходимую, в частности, для расположения внутри резонатора удвоителя частоты, удалось получить при использовании сферического зеркала с  $r = 15$  мм. Поэтому в экспериментах по генерации второй гармоники использовалось только глухое (при  $\lambda = 914$  нм) сферическое зеркало.

На рис.4 показана зависимость мощности выходного излучения от мощности накачки для резонатора с плоским зеркалом и минимальной рабочей длиной. Эта зависимость имеет сложный характер, определяемый, в том числе, и образованием термолинзы. Мощность выходного излучения возрастает с ростом мощности накачки значительно быстрее, чем по линейному закону. Этот факт свидетельствует о возможности получения значительно большего КПД генерации с увеличением превышения мощности накачки над пороговой.

Оценки внутррезонаторной плотности излучения (на основе данных рис.4) показывают, что возможна эффективная генерация второй гармоники с использованием в качестве внутррезонаторного удвоителя частоты просветленного (для  $\lambda = 914$  и  $457$  нм) с двух сторон кристалла  $\text{LiIO}_3$  длиной 2 мм. Вывод синего излучения осуществлялся через сферическое зеркало. Была получена устойчивая генерация синего излучения. Мощность излучения на выходе лазера достигала  $\sim 6$  мВт.

Таким образом, проведенные исследования показали, что кристаллы  $\text{YVO}_4:\text{Nd}^{3+}$  могут быть достаточно эффективны в лазерах с относительно простой конфигурацией резонатора при генерации с  $\lambda = 914$  и  $457$  нм. Оптимизация реализованного нами устройства позволит, мы надеемся, получить мощность синего излучения, по крайней мере, порядка нескольких десятков милливатт.

1. Shen D., Liu A., Song Y., Ueda K. *Appl. Optics*, **37**, 7785 (1998).
2. Chen Y.F., Huang T.M., Wang C.L., Lee L.L. *Appl. Optics*, **37**, 5727 (1998).
3. Лындин Н.М., Сычугов В.А., Усиевич Б.А. *Квантовая электроника*, **22**, 503 (1995).

V.A.Sychugov, V.A.Mikhailov, V.A.Kondratyuk, N.M.Lyndin, J.Frahm, A.I.Zagumennyi, Yu.D.Zavartsev, P.A.Studenikin. Short-wavelength ( $\lambda = 914$  nm) microlaser operating on a  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  crystal.

Conditions for lasing at  $\lambda = 914$  nm in a diode-pumped  $\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$  crystal were determined. The possibility of intracavity frequency doubling of the microlaser emission with the aid of a  $\text{LiIO}_3$  crystal was demonstrated.