

УДК 621.373.826.038.825.2

А. М. Шилов^{1,2}, А. Н. Гончаров^{1,2}, А. Э. Бонерт¹

¹ Институт лазерной физики СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 13/3, Новосибирск, 630090, Россия

² Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: shilov@laser.nsc.ru

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ЛАЗЕР НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 914 НМ С УЗКОЙ ЛИНИЕЙ ГЕНЕРАЦИИ ДЛЯ СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ ХОЛОДНЫХ АТОМОВ МАГНИЯ*

В работе представлены результаты исследований по созданию одночастотного Nd:YVO₄ лазера на длине волны 914 нм с плавной перестройкой частоты. Накачка осуществляется 8-ваттным диодным лазером, выходная мощность лазера в непрерывном режиме составляет 300 мВт при ширине линии излучения менее 250 кГц. Предлагается перспективное использование разработанного лазера в качестве источника пробного излучения на длине волны 457 нм для оптического стандарта частоты на основе интеркомбинационного $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$ перехода атомов магния, охлажденных и локализованных в магнитооптической ловушке.

Ключевые слова: стабилизация частоты, одночастотный Nd:YVO₄ лазер с диодной накачкой на длине волны 914 нм, спектроскопия атомов Mg.

Введение

Твердотельные лазеры с диодной накачкой, обладая высокой энергетической эффективностью, сравнимой с эффективностью диодных лазеров, и в то же время демонстрируя пространственные и спектральные характеристики излучения, не уступающие характеристикам газовых и полупроводниковых лазеров, в последнее время нашли самое широкое применение в науке и технике. Наибольшее значение имеют лазеры на основе неодима и иттербия. Благодаря стремительному прогрессу в нелинейной оптике, связанному с разработками нелинейных кристаллов с регулярной доменной структурой (ppLN [1], ppKTP [2], ppSLT [3]), можно получать преобразование частоты ИК-излучения в видимый диапазон с высокой энергетической эффективностью (до 70–80 % при мощности ИК-излучения 0,5–1,0 Вт), таким образом существенно расширяя область применения твердотельных лазеров с диодной накачкой.

Наиболее интересным для нас является использование твердотельного лазера в качестве источника излучения для оптического стандарта частоты. Схема энергетических уровней атома магния Mg²⁴ является перспективной для создания оптического стандарта частоты на основе узких оптических переходов в нейтральных атомах. Наличие «часового» перехода $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$ с естественной шириной 30 Гц и быстрого замкнутого перехода $^1S_0 \rightarrow ^1P_1$ обеспечивает эффективное охлаждение и захват атомов магния в магнитооптическую ловушку, что можно использовать при создании стандарта частоты в оптическом диапазоне спектра с относительной погрешностью 10^{-15} – 10^{-16} . Источник излучения на длине волны 457 нм, используемый для спектроскопии «часового» перехода, должен иметь область плавной перестройки, включающую частоту магниевого перехода, а также обладать высокой стабильностью частоты. Требуемая мощность излучения должна составлять 100–200 мВт. В настоящее время такими

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 05-02-16597-а, 08-02-00730-а) и Президиума СО РАН.

источниками служат: лазер на красителе с накачкой ультрафиолетовым Ar^+ лазером [4]; титан-сапфировый лазер с удвоением частоты [5]; усиленный диодный лазер с удвоением частоты [6]. Перечисленные установки имеют свои преимущества и недостатки, но все они сложные и дорогие в обслуживании.

Благодаря прогрессу в твердотельных лазерах с диодной накачкой появилась возможность использования Nd:YVO_4 лазера с удвоением частоты в качестве источника излучения на длине волны 457 нм. Наряду с традиционными переходами ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ и ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ в ионе неодима также есть слабый переход ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ с длиной волны 914 нм. Существует несколько реализаций Nd:YVO_4 лазера на переходе ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ [7–10], более того, представлен коммерческий вариант¹. Однако задача создания одночастотного перестраиваемого узкополосного лазера на длине волны 914 нм, пригодного для спектроскопии сверхвысокого разрешения атомов Mg, актуальна и сейчас [11].

В настоящей работе представлен непрерывный Nd:YVO_4 лазер на длине волны 914 нм, выходная мощность которого в одночастотном режиме составляет более 300 мВт при мощности накачки 8 Вт. При этом диапазон плавной перестройки частоты достигает 5 ГГц. Ширина линии излучения менее 250 кГц получена при стабилизации частоты лазера по внешнему эталону Фабри – Перо.

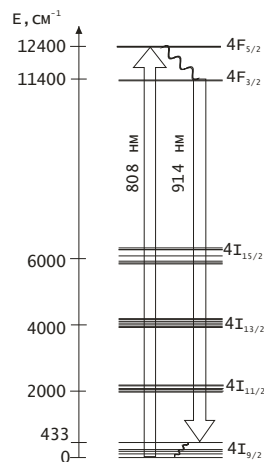


Рис. 1. Схема энергетических уровней иона Nd^{3+} в матрице кристалла YVO_4

Описание лазера

Особенности получения генерации на длине волны 914 нм в кристалле Nd:YVO_4 . Схема уровней иона Nd^{3+} в решетке кристалла YVO_4 (рис. 1) позволяет получать генерацию на длинах волн 1,06, 1,34 мкм и на других длинах волн, в том числе и на 0,914 мкм. Особенностью последнего перехода (${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$) является то, что энергия нижнего уровня равна всего 433 см^{-1} , и при комнатной температуре его населенность составляет $\sim 5\%$. Генерация на этом переходе происходит по квазитрехуровневой схеме [12; 13]. Населенность нижнего уровня вносит дополнительные потери в резонатор на длине волны генерации, существенно увеличивая пороговую мощность накачки.

Еще одной особенностью генерации на 914 нм, в отличие от генерации на сильном переходе ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ на длине волны 1 064 нм, является то, что сечения вынужденного излучения для поляризации σ (\parallel оси a) и π (\parallel оси c) отличаются незначительно [14]. Поэтому излучение генерации может быть как линейно поляризованным в одной из плоскостей σ или π , так и поляризованным в обеих плоскостях одновременно. Но благодаря наличию анизотропии кристалла можно настроить резонатор на устойчивую генерацию одной из поляризаций.

Из других особенностей кристалла Nd:YVO_4 следует отметить относительно низкую теплопроводность кристалла по сравнению, например, с Nd:YAG , что существенно сказывается на теплопереносе и ведет к появлению сильной термической линзы [15]. Кроме того, низкая теплопроводность ведет к повышению температуры кристалла, в результате чего уменьшается время жизни верхнего лазерного уровня [16], и возрастает относительная населенность нижнего уровня, а вместе с тем и потери на перепоглощение, что существенно ухудшает генерационные характеристики активной среды.

Тем не менее нам удалось реализовать одночастотный перестраиваемый лазер в компактной линейной конфигурации, эффективность которого близка к теоретически возможной.

Конфигурация Nd:YVO_4 лазера. Схема разработанного нами Nd:YVO_4 лазера показана на рис. 2. Источником накачки является

¹ См.: <http://www.lasersystem.de>

8 Вт диодный лазер (UM7800/100/20, производство JENOPTIK Laserdiode GmbH, Германия) на длине волны 808 нм с волоконным выходом диаметром 100 мкм и числовой апертурой 0,22 (параметр качества пучка $M^2 = 43$), ширина спектра накачки ~ 2 нм. Фокусирующая система представляет собой просветленный трехлинзовый объектив. Пропускание фокусирующей системы равно 85 %, диаметр пятна накачки в кристалле – 170 мкм.

Излучение накачки фокусируется в кристалл Nd:YVO₄ длиной $L = 1$ мм и атомной концентрацией ионов неодима $N_0 \approx 0,4$ % (срез перпендикулярен оси a кристалла). Первая грань кристалла имеет диэлектрическое покрытие, обладающее высоким пропусканием для длин волн $\lambda = 0,808, 1,06, 1,34$ мкм и высоким отражением для $\lambda = 0,914$ мкм. Вторая грань кристалла просветлена для $\lambda = 0,914$ мкм. Падающая на кристалл мощность накачки равна $P_p = 6,4$ Вт. Отвод тепла от кристалла осуществляется через боковые грани. Для этого он закреплен с помощью индиевой фольги в медную оправку. Плоское выходное зеркало (пропускание на длине волны генерации $T_{914} = 2,5$ %) расположено на пьезокерамическом преобразователе, который состоит из двух элементов. Один из них используется в «быстром» кольце обратной связи, второй – в «медленном». Длина резонатора составляет 8–10 мм, а ее увеличение приводит к значительному уменьшению мощности (рис. 3) из-за эффекта термической линзы, который приводит к рассогласованию перетяжки резонатора с перетяжкой излучения накачки. Получение одночастотного режима генерации в линейном резонаторе существенно осложняется пространственной неоднородностью коэффициента усиления активной среды (эффект «выгорания дыр») [17]. В нашем случае, селекция мод осуществляется внутррезонаторным эталоном Фабри – Перо, выполненном в виде пластинки из плавленного кварца толщиной 0,19 мм, грани которой имеют покрытия с коэффициентом отражения $R \approx 30$ % на длине волны 914 нм. Плавная перестройка частоты без перескоков моды генерации лазера осуществляется подачей напряжения на «медленную» ПК. Для контроля перестройки используется интерферометр Фабри – Перо с малой базой (область свободной дисперсии 900 ГГц). Весь лазер, за исключением лазера накачки,

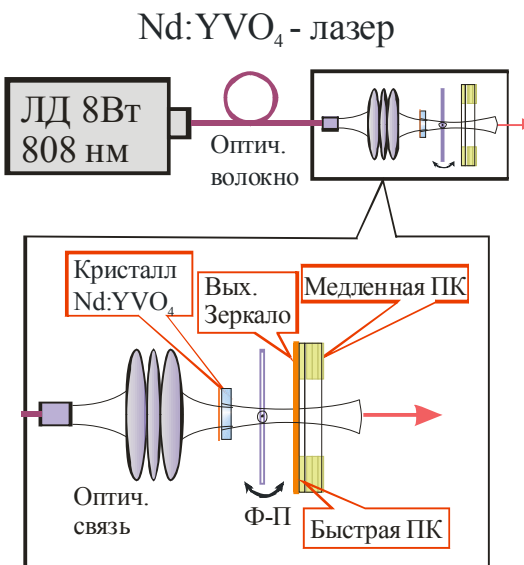


Рис. 2. Схема перестраиваемого одночастотного Nd:YVO₄ лазера. ЛД – диодный лазер накачки мощностью 8Вт; Оптич. волокно – волокно диаметром 100 мкм, числовая апертура NA = 0,22; Оптич. связь – система ввода и фокусировки излучения накачки; Кристалл – кристалл Nd:YVO₄ длиной 1 мм с атомной концентрацией ионов Nd³⁺, равной 0,4 %; Ф-П – внутррезонаторный эталон Фабри – Перо; Вых. зеркало – выходное зеркало $T_{914} = 2,5$ %; Быстрая и Медленная ПК – пьезокерамические преобразователи «быстрого» и «медленного» колец

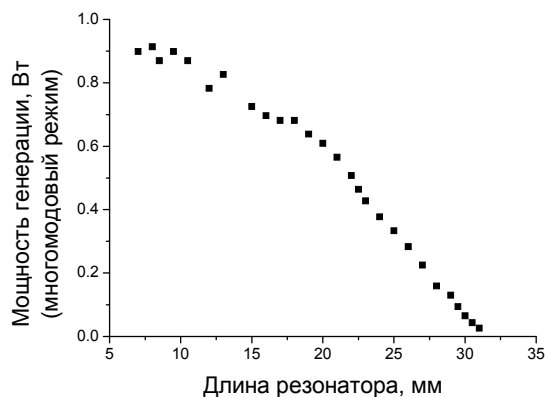


Рис. 3. Зависимость выходной мощности лазера от длины резонатора

выполнен в виде жесткой компактной конструкции размером $150 \times 110 \times 90$ мм³.

Следует отметить, что излучение накачки не поляризовано, а коэффициент поглощения излучения, поляризованного вдоль оси c кристалла, в 2,7 раза выше, чем для ортогональной поляризации. Поэтому доля погло-

щенной мощности накачки составляет лишь 50 % при пороговых значениях мощности и всего 30 % при максимальной мощности накачки ввиду насыщения перехода на 808 нм. Значительная доля (70 %) мощности накачки не используются в нашей конфигурации лазера. В дальнейшем для более эффективного использования мощности накачки, мы планируем провести исследования по оптимизации длины кристалла и концентрации ионов Nd^{3+} и возможности использования линейно поляризованного излучения накачки.

Энергетические параметры Nd:YVO₄ лазера. На рис. 4 приведена зависимость выходной мощности лазера в многомодовом режиме (без внутриврезонаторного эталона) от мощности накачки для различных коэффициентов пропускания выходного зеркала. Коэффициент пропускания выходного зеркала варьировался от 1 до 5 %. Для данного уровня мощности накачки и потерь в резонаторе оптимальное значение пропускания выходного зеркала составляет 2,5–3 %. В окончательной конфигурации лазера мы используем зеркало с пропусканием $T = 2,5\%$.

Пороговая мощность накачки и дифференциальная эффективность лазера (тангенс угла наклона зависимости выходной мощности лазера от мощности накачки при мощности накачки превышающей поро-

вую), работающего по квазитрехуровневой схеме, определяются как [13]:

$$P_{th} = \frac{\pi h \nu_p (\omega_p^2 + \omega_g^2)}{4\sigma_e (f_l + f_u) \tau \eta_a} (T + \Delta + 2\sigma_e f_l N_0 L);$$

$$\frac{dP_{out}}{dP_p} = \frac{T}{\Delta + T} \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda_g} \eta_a \cdot s,$$

где $h\nu_p = 2,46 \cdot 10^{-19}$ Дж – энергия кванта накачки; $\omega_p = 85$ мкм, $\omega_g = 90$ мкм – перетяжка излучения накачки и резонатора, соответственно; $\sigma_e = 5 \cdot 10^{-20}$ см² – сечение вынужденного излучения на длине волны 914 нм [14]; $f_l = 0,05$, $f_u = 0,52$ – относительная населенность нижнего и верхнего лазерных уровней соответственно (при температуре 300 К); $\tau = 100 \cdot 10^{-6}$ с – время жизни верхнего лазерного уровня; η_a – доля поглощенной мощности накачки (при пороговых значениях мощности накачки $\eta_a = 0,5$, при максимальной мощности накачки в режиме генерации $\eta_a = 0,3$); T – коэффициент пропускания выходного зеркала; Δ – внутриврезонаторные потери за обход (исключая пропускание выходного зеркала и потери на перепоглощение); $N_0 = 0,5 \cdot 10^{20}$ см⁻³ – концентрация ионов Nd^{3+} ; $L = 1$ мм – длина активного элемента; $\lambda_p = 808$ нм, $\lambda_g = 914$ нм – длина волны излучения накачки и генерации; s – параметр, зависящий от геометрических характеристик пучков накачки и генерации ω_p/ω_g , величины $B = 2\sigma_e f_l N_0 L / (\Delta + T)$ – отношение потерь на перепоглощение к другим потерям в резонаторе (включая пропускание зеркал), а также от уровня превышения мощности накачки над пороговым уровнем P_p/P_{th} . В нашем случае параметр s принимает значение, близкое к 1.

Определение внутриврезонаторных потерь Δ вблизи порога генерации может привести к существенным ошибкам, так как наблюдается нелинейный рост мощности генерации из-за резкого уменьшения потерь на поглощение в кристалле на длине волны генерации (914 нм). Используя данные по мощности генерации для более стабильного диапазона $P_p/P_{th} > 2$, значение внутриврезонаторных потерь нами было оценено величиной $\Delta = 3,5\%$.

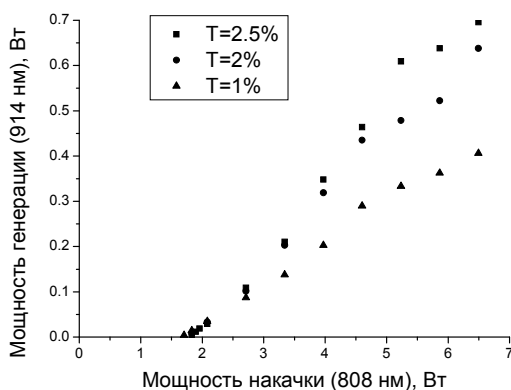


Рис. 4. Выходная мощность Nd:YVO₄ лазера в зависимости от мощности накачки при различных значениях пропускания выходного зеркала

Плотность мощности насыщения перехода на 914 нм определяемая как [8]

$$I_{s,g} = h\nu_g / (f_l + f_u) \sigma_e \tau,$$

где $h\nu_g = 2,17 \cdot 10^{-19}$ Дж – энергия кванта излучения генерации, равная $I_{s,g} = 80 \frac{\text{кВт}}{\text{см}^2}$.

При выходной мощности 1 Вт, перетяжке излучения $\omega_g = 90$ мкм и коэффициенте пропускания выходного зеркала $T = 2,5\%$ получаем отношение внутрирезонаторной плотности мощности генерации $I_{\text{cav}} = P_{\text{out}} / \pi \omega_g^2 T$ к плотности мощности насыщения $I_{\text{cav}} / I_{s,g} \approx 2$. Следовательно, в нашем случае потери на перепоглощение генерации уменьшаются за счет «просветления» перехода в три раза, поскольку

$$\alpha_{s,g} = \alpha_{0,g} / (1 + I_{\text{cav}} / I_{s,g}),$$

где $\alpha_{s,g}$ и $\alpha_{0,g} = \sigma_e f_l N_0$ – коэффициенты насыщенного и ненасыщенного поглощения на длине волны генерации соответственно.

Коэффициент ненасыщенного усиления g_0 при максимальной мощности накачки можно определить из соотношения $r_{\text{eff}}^2 e^{2g_s L} = 1$ – условие стационарной генерации, где r_{eff}^2 – ослабление интенсивности за обход резонатора, $g_s = g_0 / (1 + I_{\text{cav}} / I_{s,g})$ – насыщенный коэффициент усиления. Учитывая «просветление» потерь на перепоглощение, получаем выражение для усиления g_0 :

$$2 \cdot g_0 \cdot L = 2\alpha_{0,g} L + (\Delta + T) \cdot (1 + I_{\text{cav}} / I_{s,g}),$$

откуда, подставляя расчетное значение ($2\alpha_{0,g} L = 2,5\%$) и полученное значение $\Delta = 3,5\%$, находим значение ненасыщенного усиления за обход резонатора

$$2 \cdot g_0 \cdot L \approx 20\%.$$

Для зеркала с пропусканием $T = 2,5\%$ пороговая мощность накачки составляет величину 1,8 Вт, дифференциальная эффективность лазера 14%, что хорошо согласуется с расчетными значениями 1,7 Вт и 12% соответственно.

Стабилизация частоты

Для получения узкой линии генерации лазера используется стабилизация его частоты по полосе пропускания интерферометра Фабри – Перо. Результат стабилизации зависит от спектральных характеристик флуктуаций частоты лазера в свободном режиме и от динамических характеристик системы обратной связи. Источниками флуктуаций в нашей лазерной системе являются: а) пульсации мощности диодного лазера; б) внешние акустические и вибрационные возмущения, которые могут многократно усиливаться на резонансных частотах элементов конструкции лазера.

Стабилизация мощности лазера накачки. Пульсации выходной мощности диодного лазера (Unique Mode 7800/100/20) составляют ~ 1%, что приводит к ширине линии до 1,5–2 МГц. Короткие резонаторы, значительную часть которых занимает активная среда, очень чувствительны к изменению оптической длины среды. Пульсации мощности накачки, посредством термооптического эффекта изменяющие показатель преломления активной среды, существенно влияют на частоту генерации. Для уменьшения флуктуаций мощности накачки нами осуществлялась активная стабилизация мощности лазера накачки.

На рис. 5 приведена полная схема стабилизации частоты лазерной системы. Она включает в себя как систему стабилизации мощности накачки, так и систему стабилизации частоты лазера по полосе пропускания внешнего интерферометра Фабри – Перо.

Для стабилизации мощности диодного лазера используется его излучение, рассеянное в оптическом волокне и выходящее из боковой поверхности волокна. Оно регистрируется фотоприемником ФД 1, сигнал с которого подается на электронную систему автоматического регулирования. Электрический сигнал обратной связи затем складывается с постоянным напряжением, которое необходимо для управления величиной среднего тока диодного лазера, и поступает на соответствующий вход источника тока диодного лазера. Особенностью источника тока диодного лазера является то, что быст-

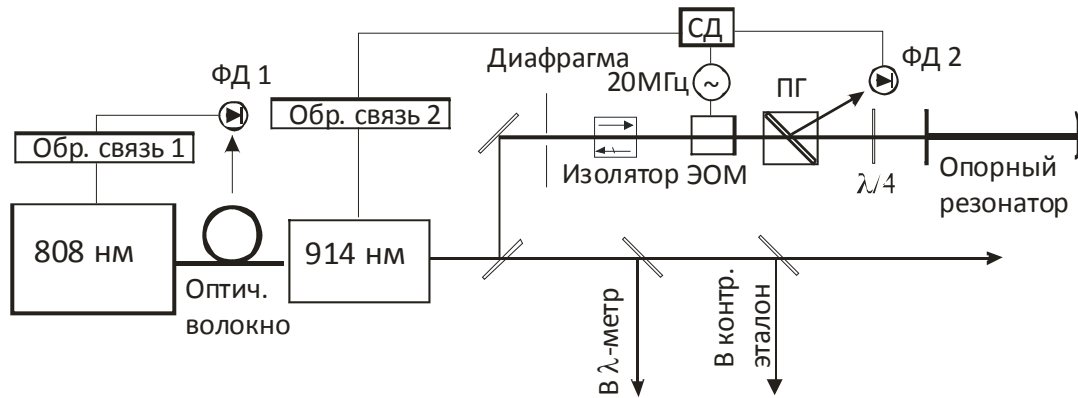


Рис. 5. Оптическая схема стабилизации частоты лазерной системы: ФД 1 и 2 – фотодетекторы; Изолятор – оптический изолятор; 20 МГц – генератор; СД – синхронный детектор; ЭОМ – электрооптический модулятор; ПГ – поляризационная призма Глана

родействие системы управления током ограничивается полосой 50 кГц. Это является основным ограничением полосы усиления в кольце отрицательной обратной связи при стабилизации мощности лазера накачки. В нашем случае единичный коэффициент усиления в кольце обратной связи находится на частоте 20 кГц. На рис. 6 представлена спектральная плотность пульсаций мощности накачки в свободном режиме и в режиме стабилизации мощности.

Стабилизация частоты лазера по внешнему интерферометру Фабри – Перо. Для уменьшения пульсаций частоты излучения Nd:YVO₄ лазера нами осуществлялась стабилизация его частоты по полосе пропускания внешнего интерферометра Фабри – Перо. Следует отметить, что в данной работе

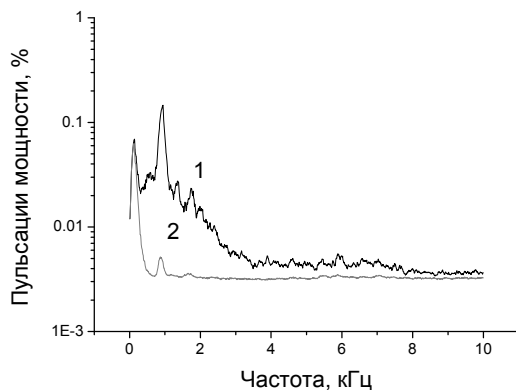


Рис. 6. Спектр пульсаций мощности накачки: 1 – в свободном режиме; 2 – в режиме стабилизации мощности накачки. Полоса пропускания анализатора спектра составляла 100 Гц

мы исследовали только точность «привязки» частоты лазера к полосе пропускания интерферометра, поэтому не применялись специальные методы изоляции (термостабилизация, вакуумирование и т. д.) самого интерферометра от внешних возмущений. Тем не менее необходимо отметить, что вся конструкция устанавливалась на массивном оптическом столе, и сам интерферометр был выполнен в виде жесткой конструкции, которая представляет собой цилиндр из инвара диаметром 50 мм с внутренним отверстием $\varnothing 15$ мм и длиной 29 см. На переднем торце цилиндра на пьезокерамическом преобразователе расположено плоское зеркало с пропусканием $T \sim 7\%$, на заднем торце – зеркало с радиусом кривизны $R = 50$ см с высокоотражающим покрытием. Параметры эталона: острота $F = 90$; область свободной дисперсии $FSR \sim 500$ МГц.

Для стабилизации частоты использовался метод Паунда – Древера – Холла [18] (Pound – Drever – Hall). Фазовая модуляция излучения лазера на частоте 20 МГц осуществляется с помощью электрооптического модулятора (ЭОМ). Отраженное от эталона излучение (см. рис. 5) регистрируется фотодетектором (ФД 2), сигнал с которого подается на синхронный детектор (СД), где выделяется сигнал ошибки, несущий информацию об отстройке частоты лазерного излучения относительно центра полосы пропускания интерферометра.

Сигнал с синхронного детектора подается на вход блока автоматической подстройки частоты АПЧ, который формирует сигнал

обратной связи отдельно для «быстрого» и «медленного» кольца (рис. 7).

«Медленное» кольцо используется для обеспечения плавной перестройки частоты лазера в широком диапазоне и компенсации медленных тепловых дрейфов частоты лазера; «быстрое» – для обеспечения динамических характеристик системы обратной связи на высоких частотах. Быстродействие кольца отрицательной обратной связи ограничивается в нашем случае динамическими характеристиками пьезокерамического преобразователя – резонанс на частоте 100 кГц с добротностью 15. Динамические характеристики «быстрой» пьезокерамики позволили получить единичный коэффициент усиления в кольце обратной связи на частоте 7–8 кГц.

На рис. 8 приведен спектр возмущений частоты лазера в режиме свободной генерации и в режиме «привязки» частоты лазера к полосе пропускания интерферометра Фабри – Перо со стабилизацией мощности излучения накачки.

Для получения ширины линии генерации лазера менее 1 кГц необходимо, чтобы на частотах выше 1 кГц остаточные возмущения были фазовыми, т. е. чтобы амплитуды возмущений на этих частотах не превышали значения частот возмущений. При анализе остаточных возмущений частоты лазера в стабилизированном режиме, можно сделать вывод, что уровень остаточных возмущения частоты лазера необходимо понизить еще на порядок. Этого можно добиться при расширении полосы отрицательной обратной связи как за счет улучшения динамических характеристик «быстрой» пьезокерамики, так и за счет использования акусто-оптического модулятора в кольце стабилизации частоты лазера по полосе пропускания интерферометра Фабри – Перо.

Оценка ширины линии излучения лазера получена умножением среднеквадратичного значения сигнала ошибки в кольце отрицательной обратной связи на крутизну частотного дискриминатора $\Delta\nu / U$, где $\Delta\nu$ – ширина пика пропускания интерферометра, равная 3 МГц, U – величина сигнала частотного дискриминатора. Оцененная ширина линии лазера в режиме стабилизации составила 200–250 кГц, в то время как без стабилизации частоты – 1,5–2 МГц.

Обр. Связь 2

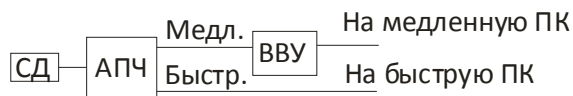


Рис. 7. Схема системы стабилизации частоты с применением «быстрого» и «медленного» кольца обратной связи. СД – синхронный детектор; АПЧ – автоматическая подстройка частоты; ВВУ – высоковольтный усилитель

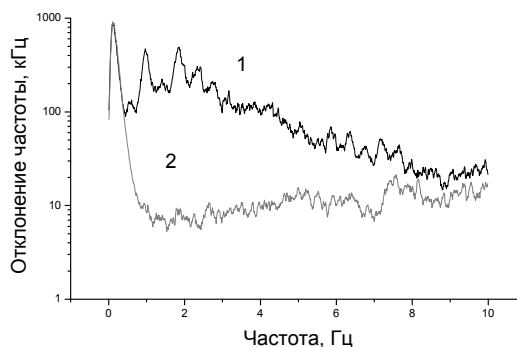


Рис. 8. Спектр частотных возмущений Nd:YVO₄ лазера: 1 – в режиме свободной генерации; 2 – в режиме стабилизации как мощности накачки, так и частоты по полосе пропускания интерферометра Фабри – Перо. Полоса пропускания анализатора спектра составляла величину 100 Гц

Заключение

Проведенные исследования позволили разработать непрерывный одночастотный перестраиваемый Nd:YVO₄ лазер с диодной накачкой и с узкой линией генерации на длине волны 914 нм. Диапазон плавной перестройки лазера включает частоту, необходимую для получения излучения, резонансного «часовому» переходу $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$ в атоме магния. Мощность излучения лазера в одночастотном режиме составила величину порядка 300 мВт и может быть увеличена при оптимизации параметров используемого кристалла и с применением накачки с линейной поляризацией. При стабилизации частоты излучения по полосе пропускания интерферометра Фабри – Перо и активной стабилизации мощности накачки получена ширина линии излучения менее 250 кГц.

Для создания излучения на длине волны 457 нм нами планируется получение второй гармоники от излучения описанного выше лазера во внешнем резонаторе с нелиней-

ным кристаллом ррSLT. Оценки показывают возможность получения мощности излучения в синей области спектра на уровне 100 мВт.

Анализ результатов эксперимента по стабилизации частоты лазера показал возможность получения субкилогерцовой линии генерации при увеличении полосы отработки возмущений частоты в 10 раз, что является достижимым при улучшении параметров «быстрой» пьезокерамики либо при использовании акусто-оптического модулятора в системе стабилизации частоты лазера.

Таким образом, проведенные исследования демонстрируют перспективность использования разработанного лазерного источника для спектроскопии атомов магния. Расширение полосы отработки возмущений частоты и использование в качестве репера частоты высокочастотного изолированного от внешних акустических и вибрационных возмущений интерферометра [19] сделает возможным использование этого лазера в спектроскопии субкилогерцового разрешения охлажденных и локализованных в магнитооптической ловушке атомов магния и в оптическом стандарте частоты на их основе [20].

Список литературы

1. Miller G. D., Batchko R. G., Tulloch W. M. et al. 42 % Efficient Single-Pass cw Second-Harmonic Generation in Periodically Poled LiNbO₃ // Optics Letters. 1997. Vol. 22. P. 1834–1836.
2. Targat R. Le, Zondy J.-J., Lemonde P. 75 %-Efficiency Blue Generation from an Intracavity PPKTP Frequency Doubler // Optic Communications. 2005. Vol. 247. No. 4–6. P. 471–481.
3. Matsumoto S., Lim E. J., Hertz H. M. et al. Quasi-Phase-Matched Second Harmonic Generation of Blue Light in Electrically Periodically Poled Lithium Tantalate Waveguides // Electronic Letters. 1991. Vol. 27. P. 2040–2042.
4. Sterr U., Sengstock K., Müller J. H. et al. The Magnesium Ramsey Interferometer – Applications and Prospects // Applied Physics B. 1992. Vol. 54. No. 5. P. 341–346.
5. Багаев С. Н., Барауля В. И., Бонерт А. Э. и др. Источник излучения на длине волны 457 нм для спектроскопии сверхвысокого

разрешения атома магния // Квантовая электроника. 2001. Т. 31, вып. 6. С. 495–499.

6. Ruseva V., Hald J. High-Power 457-nm Light Source by Frequency Doubling of an Amplified Diode Laser // Applied Optics. 2003. Vol. 42. P. 5500–5507.

7. Сычугов В. А., Михайлов В. А., Кондратюк В. А. и др. Коротковолновый ($\lambda = 914$ нм) микролазер на кристалле YVO₄:Nd³⁺ // Квантовая электроника. 2000. Т. 30, вып. 1. С. 13–14.

8. Zeller P., Peuser P. Efficient, Multiwatt, Continuous-Wave Laser Operation on the $^4F_{3/2}$ – $^4I_{9/2}$ Transitions of Nd:YVO₄ and Nd:YAG // Optics Letters. 2000. Vol. 25. No. 1. P. 34–36.

9. Schlatter A., Krainer L., Golling M. et al. Passively Mode-Locked 914-nm Nd:YVO₄ Laser. // Optics Letters. 2005. Vol. 30. P. 44–46.

10. Xue Q. H., Zheng Q., Bu Y. K. et al. High-Power Efficient Diode-Pumped Nd:YVO₄ / LiB₃O₅ 457 nm Blue Laser with 4.6 W of Output Power // Optics Letters. 2006. Vol. 31. No. 8. P. 1070–1072.

11. Stoehr H., Rehbein N., Douillet A. et al. Frequency-Stabilized Nd:YVO₄ Thin-Disk Laser // Applied Physics B. 2008. Vol. 91. P. 29–33.

12. Fan T. Y., Byer R. L. Modeling and cw Operation of a Quasi-Three-Level 946 nm Nd:YAG laser // IEEE J. Quantum Electronics. 1987. Vol. 23. No. 5. P. 605–612.

13. Risk W. P. Modeling of Longitudinally Pumped Solid-State Lasers Exhibiting Reabsorption Losses // J. Opt. Soc. Am. B. 1988. Vol. 5. P. 1412–1423.

14. Zagumennyi A. I., Mikhailov V. A., Vlasov V. I. et al. Diode-Pumped Lasers Based on GdVO₄ Crystal // Laser Physics. 2003. Vol. 13. No. 3. P. 311–318.

15. Clarckson W. A. Thermal Effects and their Mitigation in End-Pumped Solid-State Lasers // J. Phys. D: Appl. Phys. 2001. Vol. 34. P. 2381–2395.

16. Otsuka K., Kubodera K. Effects of High Density Pumping on Relaxation Oscillations and Mode Spectra in Lasers // IEEE J. Quantum Electron. 1980. Vol. 16. P. 419–424.

17. Schröder H. W., Dux H., Welling H. Single Mode Operation of cw dye Lasers // Appl. Phys. 1975. Vol. 7. No. 2. P. 21–28.

18. Drever R. W. P., Hall J. L., Kowalski F. V. et al. Laser Phase and Frequency Sta-

bilization using an Optical Resonator // Appl. Phys. B. 1983. Vol. 31. P. 97–105.

19. Webster S. A., Oxborrow M., Pugla S. *et al.* Thermal-Noise-Limited Optical Cavity // Phys. Rev A. 2008. Vol. 77. 033847 (6).

20. Bagaev S. N., Bonert A. E., Goncharov A. N. *et al.* Cooling and Trapping of Mg Atoms in MOT: Applications for Optical Frequency Standards // German-Russian Laser

Symposium 2008 (GRLS). Luebeck; Rostock; Hamburg, Germany, 2008. Talk III-2.

Материал поступил в редколлегию 19.05.2009

A. M. Shilov, A. N. Goncharov, A. E. Bonert

**SOLID-STATE LASER AT 914 NM WITH NARROW LINEWIDTH FOR FREQUENCY STANDARD
BASED ON COOL MAGNESIUM ATOMS**

In this paper, we present the results of investigations aimed at the creation of a single-frequency Nd:YVO₄ laser at 914 nm with smooth frequency tuning. An 8W diode laser is used for pumping. The output power of the laser in the cw mode is 300 mW, and the radiation linewidth is less than 250 kHz. The use of this laser as a source of probe radiation at 457 nm for the optical frequency standard based on the $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$ intercombination line of magnesium atoms cooled and captured in a magneto-optical trap holds much promise.

Keywords: frequency stabilization, single-frequency diode-pumped Nd:YVO₄ laser at 914 nm, magnesium spectroscopy.