

PACS 42.55.Rz; 42.55.Xi; 42.60.Da; 42.62.Fi

Перестраиваемый одночастотный Nd:YAG-лазер бегущей волны ($\lambda = 1319$ нм) с диодной накачкой

С.М.Игнатович, Н.Л.Квашнин, М.В.Охапкин, М.Н.Скворцов

Представлены результаты исследования одночастотного Nd:YAG-лазера бегущей волны с широким диапазоном перестройки по длине волны за счет использования внутрирезонаторного фильтра на базе кристалла КТР, управляемого температурой. Приведены выходные характеристики излучения и диапазоны перестройки частоты лазера для различных режимов работы. Впервые для Nd:YAG-лазеров на длине волны 1319 нм получен диапазон перестройки 90 ГГц при скорости перестройки -12 ГГц/°С. Выходная мощность в центре линии усиления составила ~ 240 мВт. Лазер может быть использован для спектроскопии и метрологии.

Ключевые слова: спектроскопия, лазер бегущей волны, перестройка частоты.

1. Введение

Высокотехнологичные Nd³⁺:YAG-лазеры нашли широкое применение в самых разных областях науки и техники. Это, например, спектроскопия сверхвысокого разрешения [1, 2], метрология [3, 4], прецизионные эксперименты, в том числе измерение скорости света [6, 7]. На базе лазеров с длиной волны 532 нм, стабилизированных по резонансам насыщенного поглощения в молекуле I₂, созданы малогабаритные источники излучения с относительной нестабильностью частоты лучше 10^{-14} за времена наблюдения ~ 1000 с, лазерные спектрометры сверхвысокого разрешения [2, 3, 5], баллистические гравиметры [8]. Перестраиваемые Nd:YAG-лазеры на длине волны 946 нм применяются в качестве зондирующих лазеров для исследования переходов в ионе In⁺ и создании оптических стандартов частоты на его основе [4]. Еще одна область спектроскопии, где используются Nd:YAG-лазеры – спектроскопия натрия высокого разрешения. Частота линии D2 поглощения натрия совпадает с частотой излучения, полученной с помощью суммирования частот двух Nd:YAG-лазеров с длинами волн 1319 и 1064 нм [9]. Выбор этого типа лазеров обусловлен тем, что они соответствуют необходимым для прецизионной спектроскопии требованиям, таким как малая ширина линии излучения (~ 10 кГц) и широкая область перестройки по частоте с сохранением режима одночастотной генерации.

В ИЛФ СО РАН был разработан и исследован задающий лазер с длиной волны $\lambda = 1319$ нм, усиленное излучение которого эффективно смешивается на нелинейном кристалле. Полученный лазер обладает расширенными перестроечными характеристиками по сравнению с ана-

логичным коммерческим лазером [10]. Кроме того, имеется возможность точной подстройки частоты этого лазера путем изменения длины резонатора с помощью пьезоэлектрических актюаторов, на которых установлены зеркала.

2. Конструкция лазера

Устойчивый одночастотный режим генерации может быть получен как в лазерах с линейным резонатором – при использовании тонких усиливающих сред для уменьшения конкуренции продольных мод резонатора, так и в лазерах с кольцевым резонатором – при организации режима бегущей волны. За счет пространственно однородного сдвига инверсной населенности бегущей волной, лазеры с кольцевым резонатором обладают более стабильным режимом работы.

Для получения одночастотного режима в лазерах с кольцевым резонатором необходимо реализовать однонаправленный режим обхода резонатора. В качестве оптического диода, обеспечивающего однонаправленный режим, нами был использован активный кристалл Nd:YAG, помещенный в магнитное поле. Таким образом было уменьшено количество внутрирезонаторных элементов, что положительно повлияло на долговременную стабильность параметров лазера.

В основу конструкции Nd:YAG-лазера бегущей волны положена непланарная, двухзеркальная геометрия резонатора с усиливающей средой, выполненной в виде призмы (рис.1), ранее используемая для Nd:YAG-лазеров на 1064 и 946 нм [11, 12]. Зеркало, расположенное в точке *A*, вынесено из плоскости *BCD*. Грань *B* усиливающей среды расположена под углом Брюстера θ_B , и развернута относительно оси *BC* кристалла на угол β для обеспечения непланарной геометрии.

Зеркало *A* в схеме служит для вывода излучения. Сфокусированное линзой *E* излучение диодного лазера накачки ($\lambda_{\text{pump}} = 808$ нм) вводится через зеркало *D*, которое обладает высоким коэффициентом отражения на длине волны генерации и просветлено на длине волны на-

С.М.Игнатович, Н.Л.Квашнин, М.В.Охапкин, М.Н.Скворцов
Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск,
просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: sign@laser.nsc.ru,
knl@laser.nsc.ru, maxok@laser.nsc.ru, skv@laser.nsc.ru

Поступила в редакцию 13 февраля 2012 г., после доработки – 14 марта 2012 г.

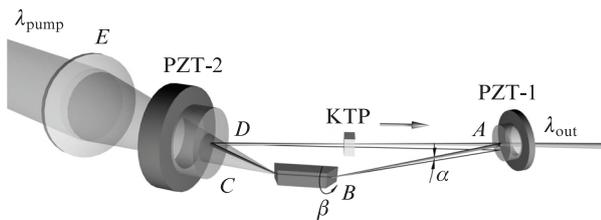


Рис.1. Оптическая схема резонатора Nd:YAG-лазера: *A* – выходное зеркало; *B* – грань кристалла Nd:YAG, ориентированная под углом Брюстера и повернутая на угол $\beta \approx 8^\circ$ вокруг оси кристалла для создания непланарности резонатора; *C* – просветленная грань кристалла Nd:YAG; *D* – селективное зеркало, пропускающее излучение накачки $\lambda_{\text{pump}} = 808$ нм и отражающее излучение основной гармоники лазера; *E* – фокусирующая линза; $\alpha \approx 4^\circ$ – угол подъема луча от плоскости резонатора; $\lambda_{\text{out}} = 1064, 532$ нм; PZT-1 и PZT-2 – пьезокерамические актюаторы.

качки. Оба зеркала также имеют высокое пропускание на 1064 нм для предотвращения генерации на данной линии, для которой усиление максимально. Для управления длиной резонатора зеркала размещены на пьезокерамических актюаторах (рис.1). Такая конфигурация обеспечивает размер перетяжки в активной среде для сагиттальной и тангенциальной составляющих пучка на уровне 100×200 мкм. Лазерный диод накачки с выходной мощностью 4 Вт и размерами тела свечения 1×200 мкм оснащен системой стабилизации температуры для согласования длин волн излучения накачки и максимума поглощения в кристалле.

Для обеспечения однонаправленного режима бегущей волны используется оптический диод на основе эффекта Фарадея в кристалле Nd:YAG, расположенном в продольном магнитном поле (постоянная Верде $V \approx 1.2 \times 10^{-7}$ рад·мм⁻¹·Гс⁻¹ на длине волны $\lambda = 1.3$ мкм). В качестве частичного поляризатора, обеспечивающего различие потерь для бегущих волн, распространяющихся в противоположных направлениях и имеющих различные поляризации после фарадеевского вращателя, служит одна из граней кристалла Nd:YAG, ориентированная под углом Брюстера. Для создания магнитного поля в кристалле Nd:YAG используется магнит NdFeB с отверстиями под кристалл и для прохождения пучка между зеркалами (отрезок AD). Данный магнит обеспечивает усредненную напряженность магнитного поля на оси кристалла на уровне 5.5 кГс. Полученная разность потерь для распространяющихся по часовой и против часовой стрелки волн составила $\sim 0.25\%$ при $\beta = 8^\circ$ ($\alpha \approx 0.5\beta$). Этого оказалось достаточно для получения устойчивого однонаправленного режима генерации.

Для увеличения перестройки длины волны излучения в резонатор лазера был введен управляемый температурой двулучепреломляющий фильтр, в качестве которого выбран кристалл КТР с ориентированными нормально к падающему лучу оптическими поверхностями [13, 14]. КТР устанавливался внутри резонатора лазера таким образом, чтобы ось Z составляла угол 45° относительно направления поляризации основного излучения. При такой конфигурации волна с линейной поляризацией, задаваемой «окном» Брюстера, разделяется в кристалле на обыкновенную и необыкновенную с различными показателями преломления.

Если разность фаз обыкновенной и необыкновенной волн кратна 2π , поляризация на выходе кристалла оста-

ется линейной и совпадает с поляризацией на входе, что приводит к отсутствию потерь на поверхности кристалла Nd:YAG, расположенной под углом Брюстера. Если же разность фаз не кратна 2π , то поляризация после нелинейного кристалла КТР становится эллиптической, что вызывает внутрирезонаторные потери на частичном поляризаторе для данной частоты генерации. Положение максимумов пропускания двулучепреломляющего фильтра зависит от разности показателей преломления n_o и n_e и длины нелинейного кристалла.

Зависимость этих величин от температуры позволяет управлять положением максимумов пропускания фильтра и, следовательно, частотой излучения лазера с помощью изменения температуры кристалла КТР. При правильном подборе параметров двулучепреломляющих фильтров можно осуществлять перестройку лазеров в широких пределах [14]. В нашем случае расчетная оптимальная длина кристалла КТР составила 1.9 мм. Период повторения максимумов пропускания фильтра равен ~ 1.75 ТГц. При такой длине кристалла максимумы просветления фильтра расположены так, чтобы при минимальных потерях на линии усиления с центром на 1319 нм создать наибольшие потери для более сильных линий с центрами на 1337 и 1355 нм и, соответственно, предотвратить генерацию лазера на этих линиях усиления активной среды для достижения максимальной области перестройки в районе 1319 нм (рис.2). Длины волн, для которых потери, вносимые двулучепреломляющим фильтром, будут минимальны, определяются следующим выражением:

$$q\lambda = l(T)[n_e(\lambda, \varphi, \theta, T) - n_o(\lambda, \varphi, \theta, T)],$$

где q – целое число, соответствующее номеру моды селектора; λ – длина волны излучения; l – длина двулучепреломляющего кристалла; φ и θ – углы, определяющие направление в кристалле относительно осей X и Z соответственно; T – температура кристалла.

Для управления температурой двулучепреломляющего фильтра контролировалась температура всего резонатора, который был выполнен из латуни и размещался на термоэлектрическом модуле Пельтье. Высокая температурная проводимость конструкции обеспечивала эффективную теплопередачу к кристаллу КТР. Конструкция позволяла перестраивать температуру лазера в диапазоне $15 - 40^\circ\text{C}$. Система автоматической подстройки температуры обеспечивала стабильность установленной температуры резонатора и кристалла КТР на уровне 10^{-2}°C .

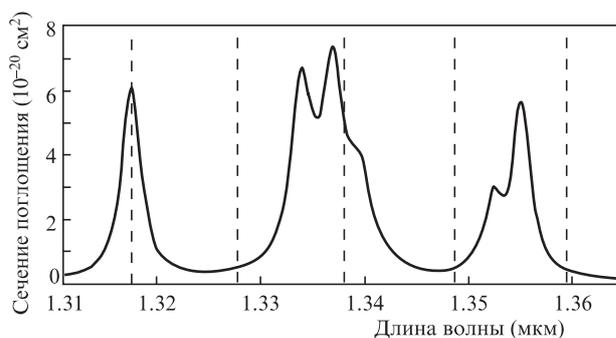


Рис.2. Расчетные сечения поглощения кристалла Nd:YAG (сплошные кривые) и положения максимумов частотного селектора на основе кристалла КТР длиной 1.9 мм (штриховые кривые).

3. Экспериментальные исследования параметров лазера

Исследования параметров лазера проводились в двух режимах работы – без внутррезонаторного селектора и с внутррезонаторным двулучепреломляющим фильтром на основе кристалла КТР.

На рис.3, 4 показаны изменения длины волны и мощности лазера в зависимости от температуры резонатора. Без внутррезонаторного селектора длина волны генерации изменялась за счет смещения центра линии усиления кристалла Nd:YAG от температуры. Диапазон перестройки частоты $\Delta\nu_1$ при изменении температуры от 14 до 36 °С составил ~28 ГГц, а наклон перестроечной характеристики – примерно -1.2 ГГц/°С. Мощность излучения лазера в отсутствие кристалла КТР $P_1 = 250$ мВт. Так как перестройка осуществлялась за счет смещения центра линии усиления Nd:YAG, выходная мощность изменялась незначительно ($\Delta P < 1\%$).

Диапазон перестройки с КТР-фильтром $\Delta\nu_2$ оказался существенно больше, чем в режиме без фильтра, и составил около 90 ГГц при изменении температуры от 18 до 26 °С. Наклон перестроечной характеристики равен -11 ГГц/°С.

Поскольку для лазера с КТР-фильтром перестройка изменяется в больших пределах, сравнимых с шириной

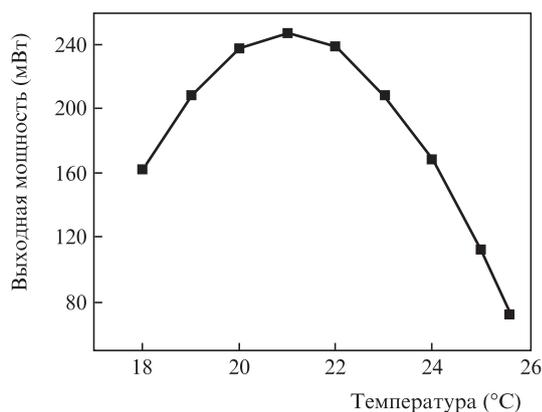


Рис.3. Зависимость выходной мощности от температуры лазера с КТР-фильтром.

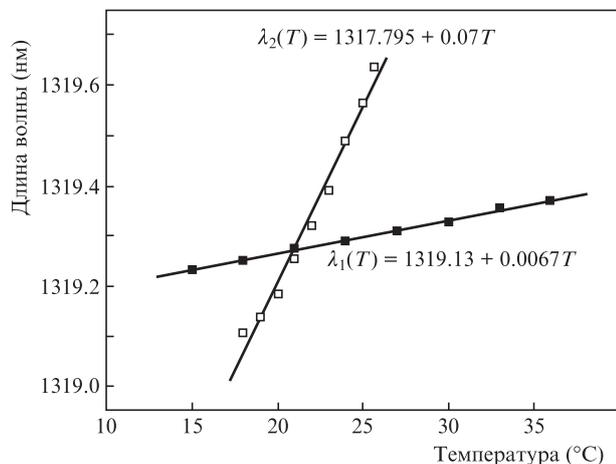


Рис.4. Зависимости длины волны (в вакууме) от температуры лазера ($\lambda_1(T)$ – для лазера без КТР-фильтра и $\lambda_2(T)$ – для лазера с КТР-фильтром).

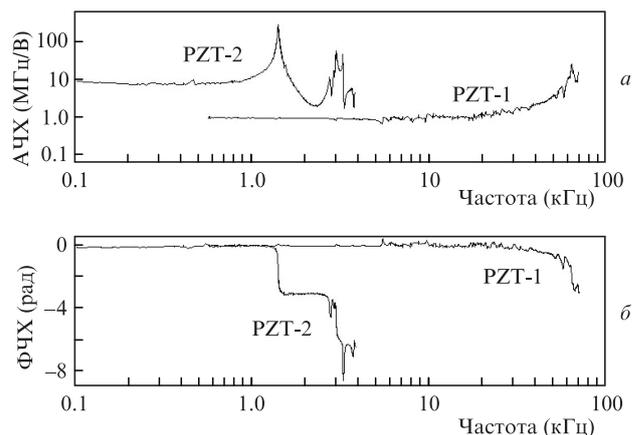


Рис.5. Амплитудно-частотные (а) и фазо-частотные (б) характеристики пьезоактюаторов PZT-1 и PZT-2.

линии усиления, мощность изменяется существенно. Максимальная мощность генерации в этом режиме равна 240 мВт при температуре 21 °С, что соответствует длине волны 1319.25 нм, и падает при отстройке от центра линии усиления до 160 мВт при температуре 18 °С и до 70 мВт при 26 °С (рис. 3). Дальнейшая перестройка температуры приводит к переходу лазера в неодночастотный режим генерации, т.к. КТР-фильтр уже не может обеспечить необходимые потери на более сильных линиях усиления. Полученная перестройка перекрыла требуемый диапазон длин волн.

Для прецизионной спектроскопии и контроля длины волны излучения лазера при его использовании в системах с автоподстройкой частоты существует возможность перестраивать частоту лазера в пределах области свободной дисперсии резонатора путем перемещения зеркал с помощью пьезоактюаторов (см. рис.1). Первый пьезоактюатор (PZT-1) применяется для более быстрых перестроек длины резонатора с частотами до 50 кГц. Чувствительность перестройки частоты лазера в этом случае составляет ~0.9 МГц/В (рис.5). Вторым пьезоактюатором (PZT-2) используется для перестройки длины резонатора с частотами до 1 кГц; чувствительность перестройки частоты – около 8 МГц/В. Диапазон перестройки частоты лазера при напряжениях сканирования ± 300 В в приведенной схеме перекрывает область свободной дисперсии резонатора лазера и составляет 2.7 ГГц.

Рабочие частоты пьезоактюаторов ограничены собственными механическими резонансами, частота и добротность которых накладывают ограничения на быстроедействие автоподстройки частоты лазера (рис.5). Характеристики резонансов пьезоактюаторов, используемых в лазере, позволяют реализовать схему автоподстройки частоты с полосой свыше 10 кГц и подавлять влияние акустических шумов на лазер.

4. Заключение

Исследованный лазер с длиной волны 1319 нм является перспективным спектроскопическим инструментом, т.к. имеет увеличенный диапазон перестройки по частоте (~90 ГГц) за счет использования внутррезонаторного селектора на основе двулучепреломляющего КТР-кристалла, перестраиваемого температурой. Мощность излучения лазера в центре области перестройки составляет ~250 мВт. Лазер может быть точно перестроен по частоте

с помощью двух пьезоактюаторов, на которых расположены зеркала резонатора. Наличие пьезоактюаторов с различными частотными характеристиками обеспечивает подстройку или модуляцию частоты лазера с различными скоростями, что широко применяется в прецизионной спектроскопии при стабилизации частоты излучения.

Ближайшим аналогом по своим характеристикам является лазер Mephisto (фирма Innolight), который, однако, имеет меньшую температурную перестройку частоты (~30 ГГц). Меньший динамический диапазон перестройки с помощью пьезоактюатора этого лазера обусловлен тем, что в качестве резонатора используется монокристалл, и это не допускает быстрой перестройки лазера внутри всей области свободной дисперсии.

Из-за увеличенного диапазона перестройки по частоте и возможности прецизионной стабилизации с помощью пьезоактюаторов созданный нами лазер может быть использован в качестве задающего лазера для экспериментов по спектроскопии D2-линии натрия.

1. Arie A., Byer R.L. *Laser Phys.*, **4** (2), 387 (1994).

2. Eickhoff M.L., Hall J.L. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, **44** (2), 155 (1995).

3. Hall J.L., Ma L-S., Taubman M., Tiemann B., Hong F-L., Pfister O., Ye J. *IEEE Trans. Instr. Meas.*, **48** (2), 583 (1999).

4. Von Zaithier J., Becker Th., Eichenseer M., Nevsky A. Yu., Schwedes Cr., Peik E., Walther H., Holzwarth R., Reichert J., Udem Th., Haensch T.W., Pokasov P.V., Skvortsov M.N., Bagayev S.N. *Opt. Lett.*, **25** (23), 1729 (2000).

5. Скворцов М.Н., Охлупкин М.В., Невский А.Ю., Багаев С.Н. *Квантовая электроника*, **34** (12), 1101 (2004).

6. Eisele Ch., Nevsky A. Yu., Schiller S. *Phys. Rev. Lett.*, **103** (9), 090401 (2009).

7. Antonini P., Okhapkin M., Göckl E., Schiller S. *Phys. Rev. A*, **71** (5), 050101 (2005).

8. Bunin I.A., Ignatovich S.M., Kalish E.N., Kvashnin N.L., Lugovoy A.A., Nosov D.A., Okhapkin M.V., Skvortsov M.N., Stus Yu. F. *Techn. Dig. ICONO-LAT-2010* (Kazan, Russia, 2010).

9. Bu Yi-kun, Zheng Quan, Xue Qing-hua, Jia Fu-qiang, Qian Long-sheng. *Optoelectron. Lett.*, **1** (1), 30 (2005).

10. http://www.innolight.de/docs/mephisto_s.html.

11. Okhapkin M.V., Skvortsov M.N., Belkin V.M., Bagayev S.N. *Opt. Commun.*, **194**, 207 (2001).

12. Okhapkin M.V., Skvortsov M.N., Belkin A.M., Kvashnin N.L., Bagayev S.N. *Opt. Commun.*, **203**, 359 (2002).

13. Кобцев С.М., Свенцицкая Н.А. *Оптика и спектроскопия*, **73** (1), 196 (1992).

14. Fan T.Y. *IEEE J. Quantum Electron.*, **27** (9), 2091 (1991).