

Лазерная система для доплеровского охлаждения иона иттербия в оптическом стандарте частоты

С.В.Чепуров, А.А.Луговой, С.Н.Кузнецов

Разработана лазерная система для доплеровского охлаждения иона иттербия на переходе $^2S_{1/2} \rightarrow ^2P_{1/2}$ в оптическом стандарте частоты на основе одиночного иона. Для охлаждения используется излучение второй гармоники полупроводникового лазера с длиной волны 739 нм. Удвоение частоты осуществляется с помощью кристалла трибората висмута, встроенного в кольцевой резонатор, который служит одновременно и опорным резонатором для стабилизации частоты лазера. Выходная мощность второй гармоники на длине волны 369.5 нм равна ~ 100 мкВт. Излучение диодного лазера модулируется электрооптическим модулятором на частоте 14.75 ГГц для генерации спектральных компонент, возбуждающих сверхтонкую компоненту охлаждающего перехода $^2S_{1/2} (F=0) \rightarrow ^2P_{1/2} (F=1)$, которая не возбуждается резонансным охлаждающим излучением. Интенсивности боковых компонент составляют несколько процентов от интенсивности резонансной линии, что достаточно для снижения времени нахождения иона в состоянии $^2S_{1/2} (F=0)$ до менее 10^{-4} с и повышения эффективности охлаждения.

Ключевые слова: диодный лазер, удвоение частоты, стабилизация частоты.

1. Введение

Стандарты частоты играют чрезвычайно важную роль как в фундаментальных научных исследованиях, так и в различных прикладных задачах. Это связано в первую очередь с тем, что точность современных стандартов частоты, реализующих эталон одной из основных единиц системы СИ – секунду, на несколько порядков больше точности эталонов других физических величин.

Создание нового поколения сверхточных оптических стандартов частоты – одна из фундаментальных задач прецизионной лазерной спектроскопии. Наиболее стабильными в настоящее время считаются стандарты на основе локализованных в пространстве атомов или ионов [1–4].

Одним из перспективных кандидатов на использование в таких оптических стандартах частоты является ион иттербия-171. Особенности строения системы энергетических уровней иона иттербия позволяют использовать для разработки оптического стандарта частоты два перехода (рис.1): квадрупольный переход $^2S_{1/2} (F=0) \rightarrow ^2D_{3/2} (F=2)$ с длиной волны $\lambda = 436$ нм и естественной шириной линии 3.1 Гц или октупольный переход $^2S_{1/2} (F=0) \rightarrow ^2F_{7/2} (F=3)$ на $\lambda = 467$ нм с естественным временем жизни несколько лет [5–7]. Для локализации иона в ловушке в режиме Лэмба–Дике применяется метод доплеровского лазерного охлаждения (см., напр., [8, 9]) на переходе $^2S_{1/2} (F=1) \rightarrow ^2P_{1/2} (F=0)$ с $\lambda = 369.5$ нм и естественной шириной линии 23 МГц. Доплеровский предел температуры на данном переходе T_D составляет ~ 0.37 мК. Возможность использования компактных диодных лазеров в схемах охлаждения иона и детектирования часового пе-

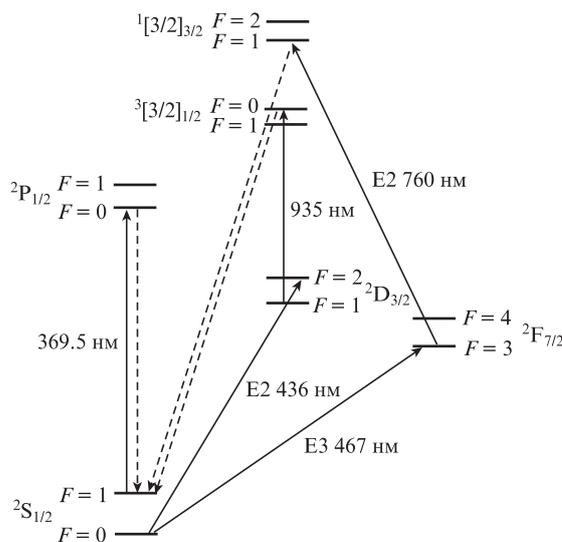


Рис.1. Схема энергетических уровней иона Yb^+ .

рехода наряду с применением волоконных линий доставки лазерного излучения делает ион иттербия-171 оптимальным кандидатом для создания оптического стандарта частоты бортового базирования. В настоящей статье представлены результаты разработки лазерной системы с длиной волны $\lambda = 369.5$ нм для доплеровского охлаждения иона иттербия-171 в оптическом стандарте частоты.

2. Лазерная система охлаждения

На рис.2 представлена схема лазерной системы для доплеровского охлаждения иона иттербия. Для охлаждения иона, захваченного в ловушку, используется модулированное по частоте излучение на $\lambda = 369.5$ нм мощностью 10 мкВт, полученное путем генерации второй гармоники излучения полупроводникового лазера с $\lambda = 739$ нм.

С.В.Чепуров, А.А.Луговой, С.Н.Кузнецов. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: svc04@ngs.ru

Поступила в редакцию 3 марта 2014 г., после доработки – 21 марта 2014 г.

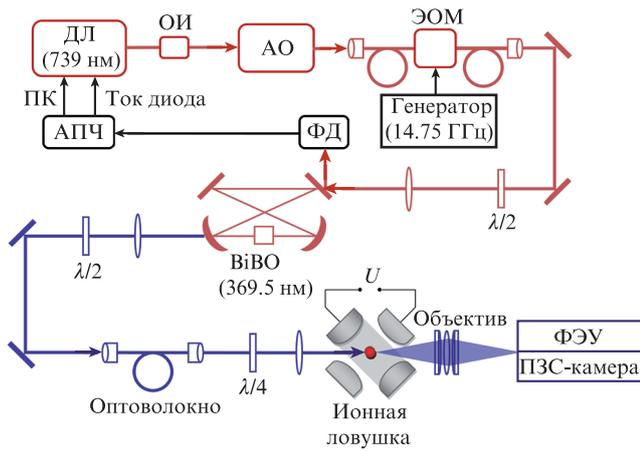


Рис.2. Схема лазерной системы для охлаждения иона Yb^+ :

ДЛ – диодный лазер; ОИ – оптический изолятор; АО – аноморфный объектив; ПК – пьезокерамика; АПЧ – система автоподстройки частоты; ФД – фотодетектор; ЭОМ – электрооптический модулятор.

Охлаждающий лазер представляет собой диодный лазер с внешним резонатором, работающим по схеме Литтрова (Tortica DL100L). Выходная мощность лазера на $\lambda = 739$ нм составляет 12 мВт (после оптического изолятора). Выходной пучок лазера имеет сечение размером 2.8×1 мм, для коррекции формы пучка используется аноморфный объектив с коэффициентом аноморфирования 3. Для охлаждения иона до доплеровского предела температуры необходима прецизионная перестройка частоты охлаждающего излучения. Изменение температуры, а также тока лазерного диода позволяет перестраивать частоту лазера в пределах интервала между продольными модами внешнего резонатора (9 ГГц). Непрерывная перестройка частоты в пределах нескольких межмодовых интервалов (до 20 ГГц) возможна при синхронном изменении длины резонатора и тока диода. Для используемого в данной работе лазера с внешним резонатором характерна ширина линии излучения ~ 100 кГц.

В рассматриваемом диапазоне длин волн одним из наиболее подходящих материалов для удвоения частоты является триборат висмута $Bi_2O_3 \cdot Bi_2O_3 \cdot Bi_2O_3$ (ViBO). Нелинейные кристаллы ViBO отличаются достаточно высоким эффективным нелинейным коэффициентом $D_{\text{eff}} = 3.3$ пм/В, высоким порогом разрушения и отсутствием гигроскопичности. В настоящей работе использовался кристалл размером $10 \times 3 \times 3$ мм с фазовым синхронизмом первого типа, для удвоения частоты излучения с $\lambda = 739$ нм угол синхронизма для данного кристалла составляет 145.5° .

При оптимальном согласовании фазы генерируемая мощность излучения второй гармоники дается выражением [10]

$$P_2 = \frac{P_1^2 (\omega_1^2 k_1 D_{\text{eff}} L h)}{\pi n_1^2 n_2 c^3 \epsilon_0}$$

Здесь P_2 – мощность излучения гармоники; P_1 – мощность основного излучения; ω_1 и k_1 – оптическая частота и модуль волнового вектора основного излучения в среде; n_1 и n_2 – показатели преломления для основной частоты и частоты гармоники; $D_{\text{eff}} = d_{31} \sin \theta_m$; θ_m – угол фазового синхронизма; L – длина кристалла; h – геометрический фактор, учитывающий эффекты фокусировки и ограни-

ченного перекрытия основного пучка и пучка излучения гармоники из-за двойного лучепреломления. Для $\lambda = 739$ нм и $\theta_m = 145.5^\circ$ рассчитанная эффективность генерации второй гармоники P_2/P_1 составляет $\sim 10^{-4}$.

Для повышения эффективности удвоения частоты излучения диодного лазера нелинейный кристалл встроен в усиливающий кольцевой резонатор, который служит одновременно и опорным резонатором для стабилизации частоты лазера. Резонатор включает в себя два плоских зеркала (входное – с коэффициентом пропускания 0.01) и два сферических с радиусом кривизны рабочей поверхности 50 мм, которые формируют перетяжку пучка в кристалле радиусом 21 мкм. Область свободной дисперсии резонатора $\Delta f = 740$ МГц. Для пространственного согласования входного пучка с модой резонатора используется сферическая линза с фокусным расстоянием 500 мм.

На рис.3 показано изменение мощности излучения, отраженного от входного зеркала кольцевого резонатора, для случая, когда частота излучения диодного лазера настроена в резонанс с модой резонатора. Ширина на половине резонансного провала (пика пропускания) $\delta f \approx 1.65$ МГц. Резкость резонатора F , определяемая как отношение области свободной дисперсии Δf к ширине пика пропускания δf , равна 450. Амплитуда провала соответствует остаточной отражательной способности резонатора $R_r = 1 - 6/8.5 = 0.29$. При мощности излучения диодного лазера на входе в усиливающий резонатор ~ 5 мВт и электронной стабилизации частоты лазера по резонансу мощность излучения второй гармоники на $\lambda = 369.5$ нм составила ~ 100 мкВт. На рис.4 приведена зависимость мощности излучения второй гармоники от мощности излучения на основной длине волны.

Полученную экспериментально мощность излучения гармоники можно сравнить с теоретической оценкой, основанной на вычисленной эффективности преобразования кристалла ViBO, на наблюдаемых потерях оптической мощности и на измеренной резкости усиливающего кольцевого резонатора. Наблюдаемая резкость усиливающего резонатора соответствует относительной потере мощности за обход резонатора $T_{\text{rt}} = 2\pi/F \approx 0.014$. Коэффициент пропускания входного зеркала $T_m = 0.01$, так что для режима согласования мод в резонаторе коэффициент усиления входного излучения $k = 4T_m/T_{\text{rt}}^2 = 204$ и остаточное отражение из-за наличия потерь и пространственного рассогласования пучков $R_L = (T_{\text{rt}} - 2T_m)^2/T_{\text{rt}}^2 \approx 0.18$. Наблюдаемая остаточная отражательная способность усиливающего резонатора $R_r \approx 0.29$ (см. выше).

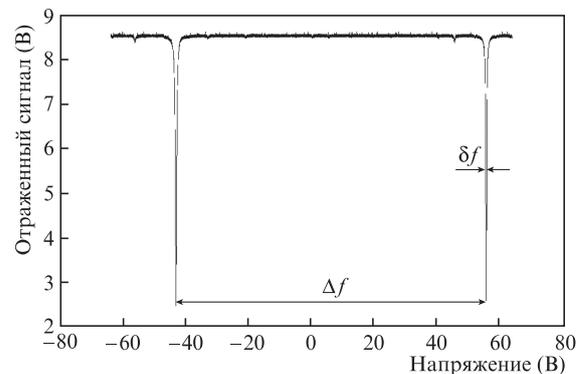


Рис.3. Резонансное изменение мощности излучения диодного лазера, отраженного от входного зеркала усиливающего кольцевого резонатора, полученное при сканировании частоты лазера.

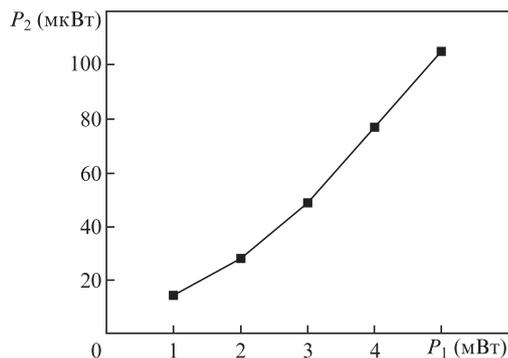


Рис.4. Зависимость мощности излучения второй гармоники от мощности излучения на основной длине волны.

Превышение R_r над R_L , примерно равное 0.11, можно объяснить неточным пространственным согласованием лазерного пучка с модой резонатора и высокочастотными шумами диодного лазера, находящимися вне полосы отработки системы автоподстройки частоты (АПЧ). Внутррезонаторная мощность с учетом мощности входного пучка $P_{DL} = 5$ мВт определяется как $P_c = (1 - R_r + R_L)kP_{DL} = 908$ мВт. Для эффективности преобразования кристаллом BiVO_4 основного излучения во вторую гармонику, равной $\sim 10^{-4}$, рассчитанная мощность излучения гармоники составляет ~ 91 мкВт, что достаточно хорошо согласуется с экспериментально полученными результатами.

Для эффективной генерации второй гармоники большая часть спектральной мощности диодного лазера должна находиться в пределах ширины линии усиливающего резонатора, что требует активной стабилизации частоты лазера. Частота лазера стабилизируется по пику пропускания усиливающего резонатора с помощью системы АПЧ (рис.2). Сигнал ошибки для системы АПЧ формируется путем слабой частотной модуляции излучения лазера за счет модуляции тока диода на частоте 200 кГц и дальнейшего синхронного детектирования модуляции мощности по отраженному от усиливающего резонатора сигналу. Низкочастотная (до 1 кГц) и высокочастотная (до 20 кГц) компоненты сигнала ошибки используются для стабилизации частоты излучения диодного лазера путем управления длиной внешнего резонатора лазера (с помощью пьезокерамики) и током диода соответственно.

Для настройки частоты гармоники в резонанс с частотой охлаждающего перехода иона используется перестройка длины усиливающего резонатора с помощью пьезокерамики. Максимальный диапазон перестройки ограничен динамическим диапазоном пьезоэлектрического преобразователя и составляет 6 ГГц. Для уменьшения флуктуаций длины усиливающего резонатора все его оптические компоненты смонтированы на монолитном термостабилизированном основании.

Излучение диодного лазера модулируется электрооптическим модулятором (ЭОМ) на частоте 14.75 ГГц для генерации спектральных компонент, возбуждающих свертонную компоненту охлаждающего перехода $^2S_{1/2} (F = 0) \rightarrow ^2P_{1/2} (F = 1)$ (рис.1), которая не возбуждается резонансным охлаждающим излучением. Для модуляции используется ЭОМ из ниобата лития EO Space PM-0K5-20-PFA-PFA-740 с волоконно-оптическими портами для ввода и вывода излучения. Область свободной дисперсии кольцевого резонатора выбрана такой, чтобы модуляционные и несущая частоты были резонансными. Таким образом, на

выходе охлаждающей лазерной системы в спектре излучения присутствуют, помимо основной (резонансной) частоты (369.5 нм), две боковые частоты, отстоящие от резонансной на 14.75 ГГц. Интенсивности боковых компонент составляют несколько процентов от интенсивности резонансной линии, что достаточно для снижения времени нахождения иона в состоянии $^2S_{1/2} (F = 0)$ до значения, меньшего 10^{-4} с.

В настоящее время ведутся исследования по доплеровскому охлаждению иона в ловушке с помощью созданной лазерной системы. Для охлаждения используется излучение второй гармоники мощностью 10 мкВт, сфокусированное в перетяжку диаметром 50 мкм. Излучение флуоресценции иона, индуцированное охлаждающим излучением, проецируется многолинзовым объективом на фотоэлектронный умножитель и на ПЗС-камеру (рис.2). Изображение, полученное с помощью камеры, используется для определения количества частиц, захваченных в ловушку, а также для контроля положения иона в ловушке. Сигнал с фотоэлектронного умножителя служит для определения общей скорости флуоресценции с высоким временным разрешением.

3. Заключение

Таким образом, в процессе проведенных исследований была разработана лазерная система для доплеровского охлаждения иона иттербия на переходе $^2S_{1/2} \rightarrow ^2P_{1/2}$ в оптическом стандарте частоты на основе одиночного иона. Для охлаждения используется излучение второй гармоники полупроводникового лазера с длиной волны $\lambda = 739$ нм. Удвоение частоты осуществляется с помощью кристалла BiVO_4 , встроенного в кольцевой резонатор, который служит одновременно и опорным резонатором для стабилизации частоты лазера. Выходная мощность второй гармоники на $\lambda = 369.5$ нм составляет ~ 100 мкВт. Излучение диодного лазера модулируется ЭОМ на частоте 14.75 ГГц для генерации спектральных компонент, возбуждающих свертонную компоненту охлаждающего перехода $^2S_{1/2} (F = 0) \rightarrow ^2P_{1/2} (F = 1)$, которая не возбуждается резонансным охлаждающим излучением. Интенсивности боковых компонент составляют несколько процентов от интенсивности резонансной линии. Этого достаточно для того, чтобы снизить время нахождения иона в состоянии $^2S_{1/2} (F = 0)$ до менее 10^{-4} с и повысить эффективность охлаждения.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН «Экстремальные световые поля и их приложения».

- Huntemann N., Okhapkin M., Lipphardt B., Weyers S., Tamm Chr., Peik E. *Phys. Rev. Lett.*, **108**, 090801 (2012).
- Madej A.A., Dube P., Zhou Zichao, Bernard J.E., Gertszov M. *Phys. Rev. Lett.*, **109**, 203002 (2012).
- Hinkley N., Sherman J.A., Phillips N.B., Schioppo M., Lemke N.D., Beloy K., Pizzocaro M., Oates C.W., Ludlow A.D. *Science*, **341** (6151), 1215 (2013).
- Chou C.W., Hume D.B., Koelemeij J.C.J., Wineland D.J., Rosenband T. *Phys. Rev. Lett.*, **104**, 070802 (2010).
- Fisk P.T.H. *Rep. Prog. Phys.*, **60**, 761 (1997).
- Roberts M., Taylor P., Barwood G.P., Gill P., Klein H.A., Rowley W.R.C. *Phys. Rev. Lett.*, **78**, 1876 (1997).
- Schneider T., Peik E., Tamm Chr. *Phys. Rev. Lett.*, **94**, 230801 (2005).
- Wineland D.J., Itano W.M. *Phys. Rev. A*, **20**, 1521 (1979).
- Stenholm S. *Rev. Mod. Phys.*, **58** (3), 699 (1986).
- Boyd G.D., Kleinmann D.A. *J. Appl. Phys.*, **39**, 3597 (1968).