

Генерация второй гармоники инфракрасного лазера для контроля частоты измерителем длины волны оптического диапазона

Б. Б. Зеленер^{1,2}, К. П. Галстян^{1,3}, Н. В. Морозов^{1,2}, Е. В. Вильшанская¹,
С. Я. Саакян¹ и В. А. Саутенков¹

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва 125412, Россия

² Московский государственный инженерно-физический институт (технический университет), Каширское шоссе, 31, Москва 115409, Россия

³ Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Ленинский пр-кт, 53, Москва 119333, Россия

E-mail: bobozel@mail.ru

Статья поступила в редакцию 8 ноября 2023 г.

Аннотация. В работе представлен метод расширения диапазона измерителя длин волн путем удвоения частоты инфракрасного (ИК) лазера с использованием нелинейного кристалла для генерации второй гармоники. Метод основан на использовании периодически поляризованного кристалла ниобата лития, легированного оксидом магния (MgO:PPLN), для генерации второй гармоники излучения ИК-лазера, что позволяет расширить возможности прибора для измерения длин волн оптического диапазона для контроля частоты ИК-лазеров. Предложенное решение упрощает экспериментальную установку, расширяет возможности измерителя длин волн и позволяет обойтись без дополнительного измерительного оборудования для ИК-диапазона. Этот метод может быть успешно интегрирован в уже существующие экспериментальные установки при сравнительно малых дополнительных затратах. <https://doi.org/10.33849/2023208>

1. ВВЕДЕНИЕ

Контроль частоты перестраиваемых лазеров необходим во многих задачах лазерной спектроскопии. Интерферометр Фабри–Перо является самым распространенным прибором для анализа частотного спектра излучения и измерения относительной частоты перестройки лазерного излучения. Ультростабильные интерферометры широко применяются в метрологии и стандартах частоты для создания стабильных лазерных систем [1]. Для стабилизации и измерения абсолютного значения частоты лазерного излучения применяют реперные газовые ячейки, атомные пучки, высокотемпературные ячейки [2] и газоразрядные лампы [3]. Однако, для многих задач найти подходящий частотный репер достаточно затруднительно. Например, для измерения энергии ридберговских переходов [4] или для измерения и стабилизации частоты лазеров в экспериментах по лазерному охлаждению щелочноземельных металлов [5].

Для лазерного охлаждения нейтральных атомов и ионов щелочноземельных [5] и редкоземельных элементов [6, 7] зачастую используются несколько источников лазерного излучения видимого и ИК-диапазонов. Современные измерители длины волны на основе интерферометров Физо [8] позволяют измерять длину волны источников лазерного излучения с абсолютной точностью менее 2 МГц, достаточной для большинства задач лазерного охлаждения. Такие измерители длины волны используют для стабилизации сразу всех источников лазерного излучения или для контроля частоты лазеров в реальном времени [8–10].

В наших экспериментах [4, 11, 12], для исследования ультрахолодной плазмы кальция используется 8 различных источников лазерного излучения: для лазерного охлаждения и захвата атомов в магнитооптическую ловушку (МОЛ) необходимо два лазера с длинами волн 423 и 671 нм; для исследования плазмы методом лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ) ионов

необходимо как минимум два источника лазерного излучения с длинами волн 397 и 866 нм; для фотоионизации или создания ридберговских атомов используются лазеры с длиной волны 390 и 797 нм [13]. Для дальнейшего охлаждения нейтрального кальция, получаемого в обычной МОЛ, необходимо использовать два дополнительных источника лазерного излучения с длинами волн 1978 и 430 нм, для захвата нейтральных атомов кальция в метастабильном состоянии в МОЛ, сформированную инфракрасным лазером (ИК-МОЛ).

Первая ИК-МОЛ для метастабильных атомов кальция была получена в работе [14]. В дальнейшем была продемонстрирована возможность субдоплеровского лазерного охлаждения в градиенте поляризаций метастабильных атомов кальция на длине волны 1978 нм [15]. Для стабилизации частоты ИК-лазера использовались резонансы поглощения в газоразрядной ячейке [3]. Естественная ширина охлаждающего оптического перехода $4s4p\ ^3P_2-4s3d\ ^3D_3$ составляет $\Gamma/2\pi = 57$ кГц [15], что соответствует доплеровскому пределу охлаждения, всего $T_D = \hbar\Gamma/(2k_B) = 1.4$ мК.

В большинстве экспериментов с щелочноземельными и редкоземельными атомами используются лазеры от оптического до ближнего ИК-диапазона (от 350 нм до 1.3 мкм). Современные измерители длины волны покрывают весь этот диапазон. Однако для измерения длины волны более 1.3 мкм необходимы специальные измерители длины волны с линейными ПЗС-матрицами, способными детектировать инфракрасное излучение. В настоящей работе предложено использовать периодически поляризованный кристалл ниобата лития, легированный оксидом магния (MgO:PPLN) для генерации второй гармоники излучения ИК-лазера. Это позволяет расширить диапазон измеряемых длин волн стандартного измерителя длины волны оптического диапазона для контроля частоты ИК-лазеров. Предложенное решение сильно упрощает экспериментальную установку,

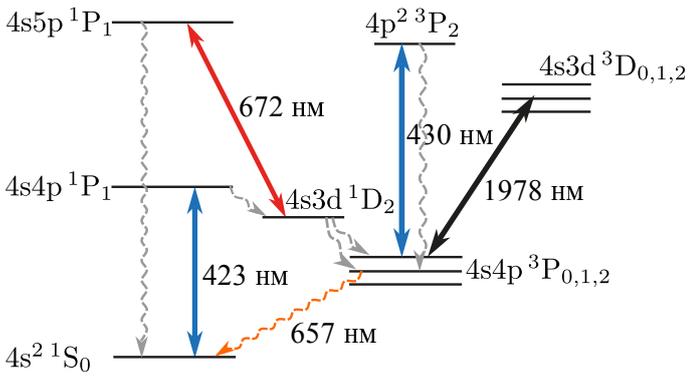


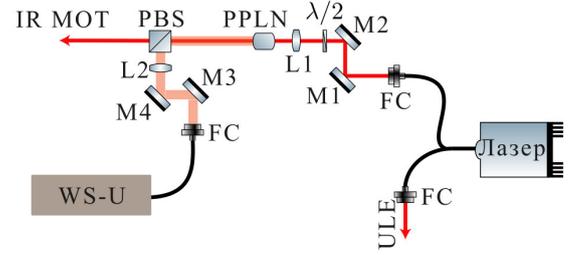
Рисунок 1. Энергетические уровни атома кальция, используемые при лазерном охлаждении в обычной и ИК-МОЛ. Волнистыми стрелками обозначены спонтанные переходы с соответствующих уровней.

расширяет возможности стандартного измерителя длины волны и избавляет от необходимости приобретать отдельный измеритель для ИК-диапазона. Данное решение может быть интегрировано в уже существующие экспериментальные установки без значительных материальных затрат.

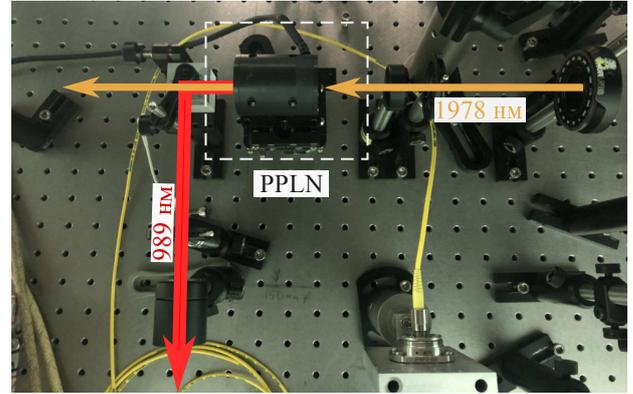
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Лазерное охлаждение и захват в МОЛ атомов кальция осуществляется на переходе $4s^2 1S_0 - 4s4p 1P_1$ при помощи лазера с длиной волны 423 нм, частота которого стабилизируется по горячей газовой ячейке с холодными окнами [2]. Для предотвращения оптической накачки атомов на долгоживущие метастабильные уровни $4s4p 3P_{0,1,2}$ используется лазер с длиной волны 672 нм, стабилизированный на частоте перехода $4s3d 1D_2 - 4s5p 1P_1$ при помощи калиброванного измерителя длины волны Angstrom WS-U, снабженного оптическим переключателем, для одновременного измерения частоты до десяти источников лазерного излучения с абсолютной точностью порядка 2 МГц. Схема уровней энергии атома кальция, используемых для лазерного охлаждения, представлена на рисунке 1. В обычной МОЛ для атомов кальция температура газа составляет порядка 2–4 мК и ограничена естественной шириной охлаждающего перехода $\Gamma/2\pi = 34$ МГц.

Для создания ИК-МОЛ из метастабильных атомов кальция используется лазер с длиной волны 1978 нм работающий на частоте перехода $4s4p 3P_2 - 4s3d 3D_3$ (см. рисунок 1). В качестве охлаждающего лазера нами используется волоконный лазер NP-Photonics (модель FLS-40-3-1978-1-1) с выходной мощностью 50 мВт и ширина линии менее 50 кГц, сравнимой с шириной охлаждающего перехода. Диапазон перестройки волоконного лазера путем изменения температуры составляет до 30 ГГц, плавная непрерывная перестройка осуществляется пьезокерамикой в диапазоне до ± 150 МГц. Для детектирования атомов, захваченных в ИК-МОЛ, используется дополнительный источник лазерного излучения с длиной волны 430 нм, настроенный на частоту перехода $4s4p 3P_2 - 4p^2 3P_2$, который осуществляет оптическую накачку атомов в ИК-МОЛ из состояния $4s4p 3P_2$ в состояние $4s4p 3P_1$. Для обнаружения атомов регистрируются



(a)



(b)

Рисунок 2. Принципиальная схема установки и фотография оптической схемы. (a) Выходное излучение волоконного лазера коллимируется при помощи волоконных коллиматоров (FC); часть излучения направляется в ультрастабильный интерферометр из стекла ULE, а другая часть, при помощи зеркал (M1 и M2), фокусируется линзой с фокусным расстоянием 75 мм (L1) в нелинейный кристалл (PPLN); вторая гармоника излучения отделяется от излучения накачки на поляризационном кубике (PBS), играющем роль дихроичного зеркала; полуволновая поляризационная пластинка $\lambda/2$ используется для согласования поляризации входного излучения лазера с осью кристалла; вторая гармоника излучения коллимируется линзой L2 и согласовывается с волоконным входом измерителя длины волны двумя зеркалами (M1 и M2) и волоконным коллиматором FC. (b) Фотография экспериментальной установки. Стрелками показан оптический путь лазера накачки с длиной волны 1978 нм и второй гармоники излучения с длиной волны 989 нм.

фотоны с длиной волны 657 нм, испускаемые атомами при спонтанном распаде из состояния $4s4p 3P_1$ в основное состояние $4s^2 1S_0$ (оранжевая волнистая стрелка на рисунке 1).

На рисунке 2 представлена принципиальная схема и фотография системы удвоения частоты. Частота волоконного ИК-лазера стабилизируется по ультрастабильному интерферометру из стекла ULE. Большая часть излучения лазера фокусируется посредством линзы с фокусным расстоянием 75 мм на торец нелинейного кристалла (производитель Covention, модель MSHG2100-0.5-40). Излучение ИК-лазера фокусируется в перетяжку с радиусом на уровне e^{-2} , равным $w_0 = \lambda f / (\pi w) = 43$ мкм, где $f = 75$ мм, $\lambda = 1978$ нм и радиус падающего на линзу пучка $w = 1.1$ мм. При этом релеевская длина составляет $z_R = \pi w_0^2 / \lambda = 2.9$ мм.

Для удвоения частоты используется периодически поляризованный кристалл ниобата лития, легированный оксидом магния (MgO:PPLN). Кристалл предна-

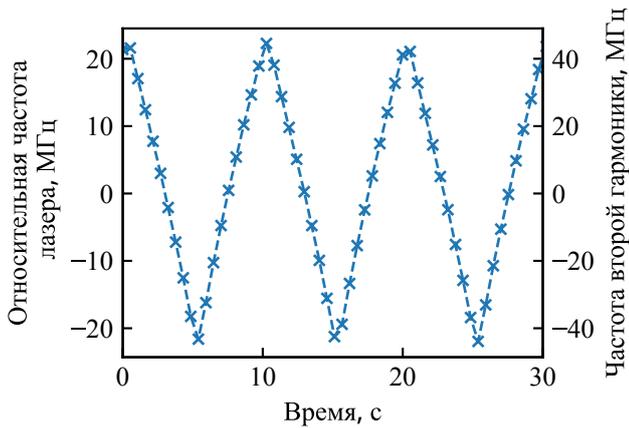


Рисунок 3. Измерение частоты ИК-лазера в режиме сканирования внешним сигналом при помощи калиброванного измерителя длины волны Angstrom WS-U. Ноль по оси ординат слева (справа) соответствует частоте 151543.805 ГГц или 1978.256 нм (303087.61 ГГц или 989.128 нм).

значен для генерации второй гармоники излучения накачки в диапазоне длин волн 1925–2250 нм (после удвоения 963–1125 нм). На кристалле находятся 9 периодически поляризованных структур (дорожек) с периодами 28.40, 29.00, 29.60, 30.20, 30.80, 31.40, 32.00, 32.60 и 33.20 мкм. Апертура каждой дорожки составляет 0.5×0.5 мм², рабочий диапазон температур составляет 30–200 °С. Кристалл состоит из нескольких дорожек с различными периодами, что позволяет при одной температуре кристалла получить вторую гармонику для нескольких различных длин волн излучения накачки. Оптимальная периодически поляризованная структура (дорожка) и температура кристалла выбираются в зависимости от длины волны лазера накачки. Длина всего PPLN-кристалла $d = 40$ мм, толщина 5 мм, ширина 10 мм. Кристалл помещен в печь (Covesion PV40), температура которой регулируется прецизионным термостатом (Covesion OC2) с точностью ± 0.01 °С. Удвоенное излучение с длиной волны 987 нм и излучение накачки с длиной волны 1978 нм разделяются на выходе кристалла-удвоителя при помощи поляризационного делительного кубика, играющего роль дихроичного зеркала.

Вторая гармоника излучения накачки заводится в одномодовое оптическое волокно и передается в многоканальный переключатель измерителя длины волны Angstrom WS-U. Большая часть излучения лазера накачки проходит через PPLN-кристалл и формирует пучки ИК-МОЛ.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 3 представлено измерение частоты при плавной перестройке длины волны лазера внешним напряжением, подаваемым на пьезокерамику. Ноль по оси ординат соответствует частоте 151543.805 ГГц или 1978.256 нм. Экспериментально была выбрана периодически поляризованная структура (дорожка) на кристалле и подобрана оптимальная температура кристалла ≈ 81 °С. Мощность после удвоения частоты составила 2.5 мкВт, при мощности накачки 25 мВт. Современные измерители длины волны используют для регистрации интерференционной картины ПЗС-линейки, имеющие большую чувствительность [8]. Для измерения длины волны необходима очень малая мощность лазерного излучения. Предложенная в работе оптическая схема позволяет использовать излучение накачки (1978 нм), прошедшее через PPLN-кристалл, в дальнейших экспериментах для создания ИК-МОЛ. Это решение сильно упрощает юстировку и проектирование удвоителя частоты на основе PPLN-кристалла, в отличие от систем удвоения частоты с резонаторами Фабри–Перо или кольцевыми резонаторами. В случае необходимости, большую эффективность удвоения частоты можно достигнуть лучшим пространственным согласованием излучения накачки с PPLN-кристаллом и подбором оптимальной дорожки на кристалле (и соответствующей ей оптимальной температуры кристалла). Общая эффективность удвоения частоты зависит от отношения длины кристалла к конфокальному параметру $2z_R$. Согласно [16] оптимальным является значение отношения $d/(2z_R) = 2.84$. Теоретически, наибольшей эффективности удвоения можно достигнуть фокусировкой пучка накачки линзой с фокусным расстоянием $f = 116$ мм, тогда ширина пучка на уровне e^{-2} составит $w_0 = 66$ мкм. Как было показано в работе [17] эффективность удвоения частоты может достигать более 50%. В нашем случае, существенное увеличение эффективности удвоения приведет к уменьшению мощности излучения, формирующего ИК-МОЛ, и является нежелательным.

Для получения ИК-МОЛ отдельной проблемой является настройка лазера на частоту охлаждающего перехода $4s4p\ ^3P_2-4s3d\ ^3D_3$. Длина волны перехода была измерена в работе [18] и составляет 1977.679 нм в воздухе (или 1978.219 нм в вакууме, что соответствует частоте 151546.6 ГГц). Частота охлаждающего перехода известна с неудовлетворительной точностью, учитывая естественную ширину данного перехода, которая составляет всего $\Gamma/2\pi = 57$ кГц. Для настройки и отладки ИК-МОЛ необходимо экспериментально определить резонансную частоту перехода, зарегистрировав взаимодействие лазерного излучения с парами кальция (поглощение или факт захвата атомов в ИК-МОЛ) с последующим измерением частоты лазерного излучения при помощи калиброванного измерителя.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен удобный и простой способ расширения диапазона измеряемых длин волн стандартного измерителя длин волн оптического диапазона при помощи удвоения частоты ИК-лазера нелинейным PPLN-кристаллом. Современные прецизионные измерители длины волны не имеют подвижных частей и состоят из интерферометров Физо, собранных в монолитном корпусе. Увеличение диапазона измерений за счет удвоения частоты измеряемых лазеров PPLN-кристаллом также является крайне стабильным решением ввиду отсутствия резонатора в оптической схеме. Благодаря своей стабильности и отсутствию подвижных частей системы на основе PPLN-кристаллов нашли применение в космических экспериментах [17]. Описанная в работе система удвоения частоты представляет собой очень простое и сравнительно недорогое решение,

которое может быть интегрировано как в уже существующие установки, так и в коммерческие измерители длины волны в качестве дополнительной опции.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-01129-23-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жаднов Н О, Масалов А В, Сорокин В Н, Хабарова К Ю и Колачевский Н Н 2017 *Квантовая электроника* **47** 421–5
2. Vilshanskaya E V, Saakyan S A, Sautenkov V A, Murashkin D A, Zelener B B and Zelener B V 2018 *J. Phys.: Conf. Ser.* **946** 012130
3. Hansen D and Hemmerich A 2005 *Phys. Rev. A* **72** 022502
4. Зеленер Б Б, Саакян С А, Саутенков В А, Вильшанская Е В, Зеленер Б В и Фортов В Е 2019 *Письма в ЖЭТФ* **110** 767–71
5. Mills M, Puri P, Yu Y, Derevianko A, Schneider C and Hudson E R 2017 *Phys. Rev. A* **96** 033402
6. Provorchenko D, Tregubov D, Mishin D, Yaushev M, Kryuchkov D, Sorokin V, Khabarova K, Golovizin A and Kolachevsky N 2023 *Atoms* **11** 30
7. Семенин Н В, Борисенко А С, Заливако И В, Семериков И А, Аксенов М Д, Хабарова К Ю и Колачевский Н Н 2022 *Письма в ЖЭТФ* **116** 74–9
8. Саакян С А, Саутенков В А, Вильшанская Е В, Васильев В В, Зеленер Б Б и Зеленер Б В 2015 *Квантовая электроника* **45** 828–32
9. Couturier L, Nosske I, Hu F, Tan C, Qiao C, Jiang Y H, Chen P and Weidemüller M 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 043103
10. Kim J, Kim K, Lee D, Shin Y, Kang S, Kim J R, Choi Y, An K and Lee M 2021 *Sensors* **21** 6255
11. Зеленер Б Б, Бронин С Я, Вильшанская Е В, Вихров Е В, Галстян К П, Морозов Н В, Саакян С А, Саутенков В А и Зеленер Б В 2022 *Квантовая электроника* **52** 523–7
12. Zelener B B, Vilshanskaya E V, Morozov N V, Saakyan S A, Bobrov A A and Zelener B V 2022 Steady-state ultracold plasma arXiv:2212.04389 [physics.plasm-ph]
13. Зеленер Б Б, Вильшанская Е В, Саакян С А и Саутенков В А 2022 *Вестник ОИВТ РАН* **7** 85–6
14. Grünert J and Hemmerich A 2001 *Appl. Phys. B* **73** 815–8
15. Grünert J and Hemmerich A 2002 *Phys. Rev. B* **65** 041401(R)
16. Boyd G D and Kleinman D A 1968 *J. Appl. Phys.* **39** 3597–639
17. Lévêque T, Antoni-Micollier L, Faure B and Berthon J 2014 *Appl. Phys. B* **116** 997–1004
18. Risberg G 1968 *Ark. Fys.* **37** 231