

М.А. Губин, А.Н. Киреев, А.Б. Пнев,
Д.А. Тюриков, Д.А. Шелестов,
А.С. Шелковников, В.А. Лазарев

ОПТИЧЕСКИЙ СТАНДАРТ ЧАСТОТЫ НА ОСНОВЕ Cr^{2+} : ZnSe-ЛАЗЕРА

Рассмотрены исследования оптических стандартов частоты (ОСЧ) на основе резонансов насыщенного поглощения и дисперсии, выделяемых методами нелинейной лазерной спектроскопии в газовых ячейках низкого давления. Оценены возможности создания ОСЧ на основе Cr^{2+} : ZnSe-лазера и метановой поглощающей ячейки (Cr^{2+} : ZnSe /CH₄, $\lambda = 2,36$ мкм), обладающего долговременной стабильностью $1 \cdot 10^{-15} \dots 1 \cdot 10^{-16}$.

E-mail: apniiov@gmail.com

Ключевые слова: ОСЧ; Cr^{2+} : ZnSe-лазер; метановая ячейка; компактный транспортируемый ОСЧ; точность, стабильность, воспроизводимость ОСЧ; хранители частоты; методы спектроскопии насыщения.

Введение. Развитие ряда областей науки и техники определяется возможностью проведения высокоточных измерений времени и частоты. В течение XX в. точность измерения временных интервалов повысилась от 10^{-7} (маятниковые часы) до 10^{-15} для часов, основанных на сверхтонком квантовом переходе атома Cs, период колебаний которого определяет длительность секунды в системе СИ. Основой такого повышения послужило прежде всего повышение частоты колебаний «маятника» от единиц до 10^{10} Гц (частота эталонного перехода в Cs $\nu_{Cs} = 9,1$ ГГц). Следующий шаг в повышении точности эталона времени связан с освоением оптического диапазона и стабилизацией частоты излучения лазеров по спектральным линиям атомов и молекул в диапазоне частот $10^{14} \dots 10^{15}$ Гц, что обещает повышение точности еще на 2—3 порядка по сравнению с Cs-эталонном. Использование стабилизированного оптического излучения для измерения временных интервалов стало возможным после появления удобных средств калибровки оптических частот по частоте Cs-эталона. Такие средства калибровки — «делители оптической частоты» в 10^4 — 10^6 раз, связавшие оптический и СВЧ-диапазоны, основаны на свойствах спектра излучения лазеров, генерирующих непрерывную последовательность фемтосекундных импульсов [1, 2]. В настоящее время точность сравнения радио- и оптических частот (неточность передачи потребителю) может достигать $\sim 10^{-19}$ [3], поэтому главным источником погрешности являются оптические стандарты частоты (ОСЧ), стабилизированные по атомным или молекулярным переходам.

Определяющим фактором повышения точности, воспроизводимости и стабильности частоты является выбор реперного квантового перехода и метода регистрации спектрального резонанса и точности его определения. Требуется высокое отношение сигнал/шум (С/Ш) выделяемой реперной линии, а также устранение влияния физических и технических источников возмущений, приводящих к сдвигам стабилизированной частоты относительно частоты идеального («невозмущенного») квантового перехода.

В стандартах частоты реперная линия регистрируется по поглощению или фазовой задержке излучения внешнего генератора при взаимодействии с атомами или молекулами. Факторами, ограничивающими стабильность частоты, являются относительная ширина реперной линии, к центру которой осуществляется привязка частоты генератора, и отношение сигнал/шум, с которым эта линия выделена.

Предельная стабильность частоты, выраженная в виде среднего квадратического относительного двухвыборочного отклонения (параметр Аллана) [4], определяется соотношением

$$\frac{\sigma(2, \tau)}{\bar{\nu}} = \frac{1}{\bar{\nu}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left(\frac{\bar{\nu}_{i+1}^{\tau} - \bar{\nu}_i^{\tau}}{2} \right)^2} \geq \frac{\gamma}{\nu \sqrt{\tau}} \frac{\text{Ш}}{\text{С}},$$

где γ — ширина реперной линии; $\bar{\nu}$, ν — среднее и текущее значение несущей частоты; τ — время усреднения; Ш/С — отношение шум/сигнал.

В достижении предельной точности и воспроизводимости частоты неоспоримыми преимуществами обладают квантовые стандарты частоты (СВЧ и оптические), использующие реперные линии «холодных» атомов/ионов, захваченных в ловушках или совершающих движение в виде «фонтана» [4]. Собственная неопределенность частоты современных ОСЧ на одиночных «холодных» ионах Hg^+ и Al^+ , дополненных фемтосекундными делителями частоты (часто эти устройства называются «оптическими часами»), снижена в настоящее время до 10^{-17} [5]. Недостатком ОСЧ на одиночных частицах является малое отношение С/Ш и необходимость длительного усреднения сигнала. В значительной степени эта проблема решена в ОСЧ, использующих «холодные» атомы, захваченные в световых ловушках. Так, в ОСЧ на атомах Sr и Yb число атомов, влияющих на сигнал реперной спектральной линии, достигает $10^5 \dots 10^6$ [6]. Все указанные типы эталонов, обеспечивающие высокую точность и воспроизводимость частоты, представляют собой сложные стационарные установки.

На практике помимо эталонов данного типа требуются также компактные, относительно недорогие хранители частоты, пусть и уступающие указанным выше ОСЧ по точности и воспроизводимости, но имеющие необходимую стабильность частоты на времени усреднения $1 \dots 10^5$ с (в зависимости от области применения) и периодически калибруемые по эталонам. Наиболее стабильными и широко применяемыми на практике хранителями частоты в настоящее время являются водородные мазеры (частота излучения $\nu_H = 1,4$ ГГц). Лучшие активные Н-мазеры при суточном усреднении имеют долговременную стабильность частоты $1 \cdot 10^{-15}$ [7, 8]. Недостатком их является наличие дрейфа на времени усреднения $\tau > 10^5$ с, высокие требования к условиям эксплуатации, недостаточно высокая кратковременная стабильность частоты ($1 \cdot 10^{-13}$, $\tau = 1$ с), значительные массогабаритные параметры (75...200 кг), высокая стоимость.

В данной работе проведена оценка возможности создания хранителя частоты на основе ОСЧ с газовой ячейкой низкого давления, не уступающего по долговременной стабильности активным Н-мазерам, но на два порядка превышающего кратковременную стабильность частоты, компактного и допускающего практическую реализацию.

В настоящее время в качестве хранителя частоты на основе ОСЧ могут быть использованы He-Ne- и $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазеры, прогнозируемые показатели нестабильности которых достигают $1 \cdot 10^{-16}$ за 1 с усреднения. В данной работе исследовали $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазер.

При разработке хранителя частоты сложилась следующая методология. Среди уже изученных квантовых переходов в различных атомах и молекулах подбирают такие, ширина которых минимальна. Затем из этого набора атомов и молекул выделяют ряд веществ, при использовании которых не предъявляют высокие требования к условиям эксплуатации. В состав ОСЧ помимо вещества с требуемым квантовым переходом — репером частоты — входит лазер, длина волны которого совпадает с подходящим квантовым переходом вещества репера. Если в начале исследований выбор поглощающих переходов был ограничен из-за отсутствия «малозумящих» перестраиваемых лазеров, то в настоящее время это ограничение в значительной степени снято и при необходимости можно получить узкие резонансы насыщенного поглощения или дисперсии насыщения практически во всем видимом и ИК-диапазонах спектра. Для метрологических применений среди различных пар лазер — поглотитель наиболее разработаны вторичные ОСЧ на линиях газообразных I_2 , CH_4 , C_2H_2 , SF_6 , OsO_4 с использованием газовых, твердотельных и полупроводниковых лазеров.

В работе [9] описан эксперимент с применением $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера, активной средой которого являлся монокристалл, выращенный на

монокристаллической затравке физическим транспортом из паровой фазы с одновременным легированием в процессе роста (см. рисунок). При этом была использована оптическая накачка волоконным туллийевым лазером мощностью 2,8 Вт. Активный элемент толщиной 2,2 мм с поперечным размером 1,5×8 мм позволил получить на длине волны 2,36 мкм вблизи исследуемой линии поглощения метана излучение с выходной мощностью 61 мВт. Минимальный уровень шумов, достигнутый в этом эксперименте, составил 0,03 Гц/Гц^{1/2}. Расчеты, проведенные на основе полученных экспериментальных данных, показали, что такая комбинация Cr²⁺: ZnSe-лазера и CH₄-репера может обеспечить относительную девиацию Аллана [4] на уровне 2·10⁻¹⁶ за время усреднения 1 с.

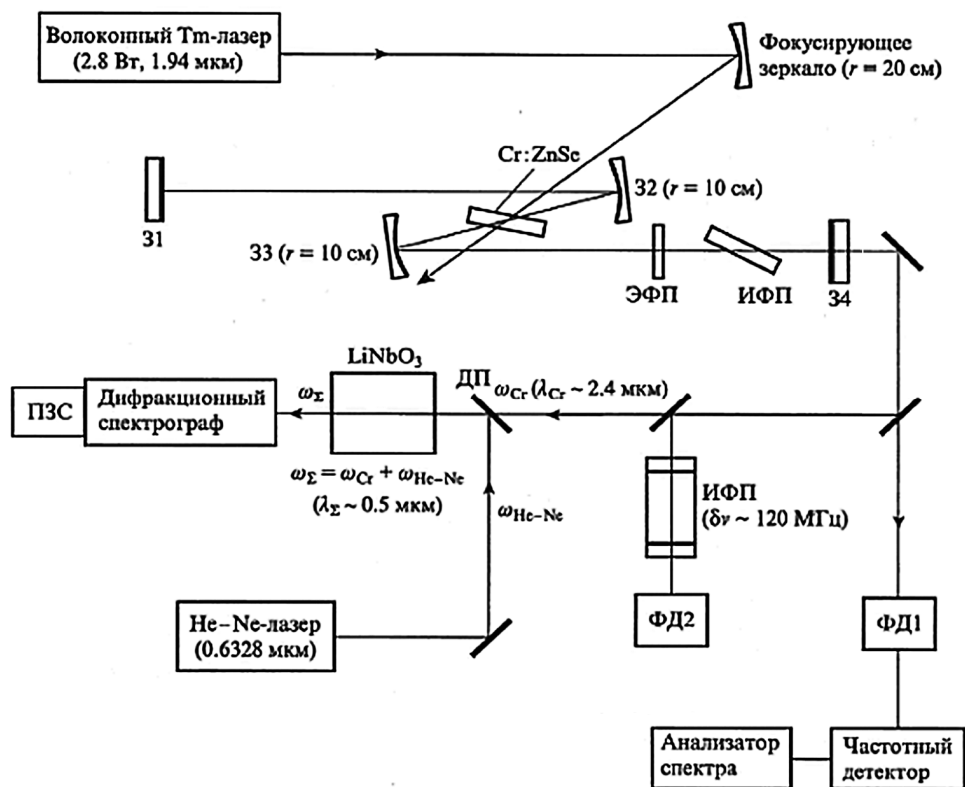


Схема экспериментальной установки:

ЭФП — эталон Фабри — Перо; ИФП — интерферометр Фабри — Перо; ДП — делитель пучка

Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что на основе Cr²⁺: ZnSe-лазера с CH₄-ячейкой возможно построение транспортируемого хранителя частоты с максимально достижимой ключевой характеристикой ОСЧ — относительной нестабильностью на уровне 2·10⁻¹⁶.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного контракта № 16.513.11.3115 от 13 октября 2011 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hall J. L. Nobel lecture: Defining and measuring optical frequencies // *Rev. Mod. Phys.* – 2006. – Vol.78. – No. 4. – P. 1279–1295; Hansch T.W. Nobel lecture: Passion for precision // *Rev. Mod. Phys.* – 2006. – Vol. 78. – No. 4. – P. 1297–1309; пер. УФН. Т. 176. № 12 (2005). – С. 1354–1380.
2. Крюков П. Г. Фемтосекундные импульсы. – М.: Физматлит, 2008. – С. 205.
3. Stenger J., Schnatz H., Tamm Ch., Telle H. R. Ultra-precise measurement of optical frequency ratios // *Phys.Rev.Lett.* 88:071601-1-4, 2001.
4. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения : Пер. с англ. – М.: Физматлит, 2009. – 512 с.
5. Chou C. W., Hume D. B., Koellemeij J. C. J. et al. Frequency Comparison of Two High-Accuracy Al⁺ Optical Clocks // *Phys. Rev. Lett.* – 2010. – Vol. 104. – P. 070802.
6. Lodewyck J., Westergaard P. G., Lorini L. et al. Trapping induced frequency shifts by comparison of two Sr optical lattice clocks at the 10⁻¹⁷ level // *Proceedings 2011 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium & European Frequency and Time Forum.* May 1–5. 2011. San Francisco. California. USA.
7. <http://www.vremya-ch.com>
8. <http://www.kvarz.com/general/1-75.html>
9. Перестраиваемый двухмодовый Cr²⁺: ZnSe-лазер со спектральной плотностью частотных шумов 0,03 Гц/Гц^{1/2} / М.А. Губин, А.Н. Киреев, В.И. Козловский и др. // *Квантовая электроника.* – 2012. – № 6. – С. 509.

Статья поступила в редакцию 26.09.2012