

$\text{CO}_2 / ^{192}\text{OsO}_4$ ЛАЗЕР:
АБСОЛЮТНАЯ ЧАСТОТА СВЕТОВЫХ КОЛЕБАНИЙ
И НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

*Ю.С.Домнин, Н.Б.Кошелёвский, В.М.Татаренков,
П.С.Шумляцкий, О.Н.Компанец, А.Р.Кукуджанов,
В.С.Летохов, Е.Л.Михайлов*

Измерено абсолютное значение частоты $\text{CO}_2 / ^{192}\text{OsO}_4$ -лазера. Обсуждаются возможности измерения с эталонной точностью частот лазеров, работающих на более коротковолновых переходах (> 28 ТГц), а также постановки эксперимента по проверке гипотезы об изменении мировых констант.

1. До настоящего времени наиболее точные измерения абсолютных частот лазеров субмиллиметрового и ИК диапазонов были выполнены с погрешностью $\approx 6 \cdot 10^{-10}$ [1, 2]. Традиционная схема измерений представляет собой цепочку, состоящую из нескольких ступеней, в которой неизвестная частота лазера на каждой ступени измеряется путем ее сравнения с суммарной или разностной частотой определенной гармоники излучения лазера предыдущей ступени и гармоники клистрона с известной частотой, измеренной по эталонному генератору. Согласно [3], перспективным путем повышения точности абсолютных измерений частот лазеров является видоизменение традиционной схемы синтеза их частот за счет использования независимого вторичного стандарта частоты на основе $\text{CO}_2 / ^{192}\text{OsO}_4$ -лазера, работающего на линии $P(14)$ на длине волны 10,53 мкм.

В этой статье сообщается о первом абсолютном измерении частоты $\text{CO}_2 / ^{192}\text{OsO}_4$ квантового репера, полученного путем стабилизации час-

тоты CO_2 -лазера на линии $P(14)$ по узкому нелинейному резонансу в колебательно-вращательном спектре молекулы $^{192}\text{OsO}_4$. $\text{CO}_2/^{192}\text{OsO}_4$ репер является первым оптическим стандартом, частота которого изменена с точностью $3 \cdot 10^{-11}$.

2. Выбор молекулы $^{192}\text{OsO}_4$ для получения узких нелинейных резонансов, пригодных для стабилизации частоты CO_2 -лазера с высокой точностью, обусловлен отсутствием спина ядер изотопов ^{192}Os и ^{16}O и ее большим молекулярным весом. Спектр этой молекулы не имеет сверхтонкой структуры, а расщепление резонанса из-за эффекта отдачи и сдвиг его частоты из-за квадратичного эффекта Допплера пренебрежимо малы (соответственно $5 \cdot 10^{-13}$ и $0,36 \cdot 10^{-15}$ град $^{-1}$). Кроме того, как показали исследования [4, 5], для нелинейных резонансов $^{192}\text{OsO}_4$ характерны хорошее совпадение их частоты с центром линии усиления и малые значения величин уширения и сдвига частоты резонансов из-за давления. По этой причине $\text{CO}_2/^{192}\text{OsO}_4$ квантовый репер является перспективным кандидатом на роль вторичного стандарта частоты промежуточного ИК диапазона с точностью воспроизведения частоты $\sim 10^{-13} - 10^{-14}$.

3. Эксперимент по синтезу частоты $\text{CO}_2/^{192}\text{OsO}_4$ -лазера проводился по предложенной в работе [3] схеме, согласно которой частота лазера сравнивалась с суммарной частотой восьмой гармоники частоты D_2O -лазера и частоты клистрона 7,5 ГГц. Как и частота клистрона, частота излучения D_2O -лазера через промежуточный HCN -лазер и набор СВЧ источников с помощью систем фазовой автоподстройки частоты была синхронизована по цезиевому эталону частоты.

Используемый в работе $\text{CO}_2/^{192}\text{OsO}_4$ -лазер имел следующие характеристики: мощность излучения, непосредственно (без расширения луча) направляемого во внешнюю нелинейно поглощающую ячейку, ≈ 100 мВт; длина ячейки 2,5 м, давление паров OsO_4 в ней около 2,5 Па. Ширина нелинейного резонанса $^{192}\text{OsO}_4$ по полувысоте на частоте линии $P(14)$ была около 200 кГц, относительный контраст 2%. Схема стабилизации частоты CO_2 -лазера представляла статическую петлю регулирования первого порядка с частотой среза примерно 100 Гц. Долговременная нестабильность частоты $\text{CO}_2/^{192}\text{OsO}_4$ -лазера на интервале времени несколько дней не превышала $3 \cdot 10^{-11}$ и определялась в основном несовершенством конструкции макета, присутствием в излучении паразитной амплитудной модуляции и недостаточно эффективной оптической развязкой между лазером и внешней ячейкой.

Мощность излучения вспомогательного CO_2 -лазера-гетеродина, привязанного по фазе (с частотной расстройкой ≈ 4 МГц) к исследуемому $\text{CO}_2/^{192}\text{OsO}_4$ -лазеру, составляла 0,5 Вт; мощность излучения D_2O -лазера ≈ 40 мВт, мощность излучения клистрона ≈ 10 мВт. Излучение всех трех источников смешивалось на точечном вольфрам-никелевом диоде. При этих условиях сигнал биений радиочастоты в диапазоне 7 МГц превышал шум на 20 дБ (в полосе 50 кГц).

Измерения частоты $\text{CO}_2/^{192}\text{OsO}_4$ -лазера производились в различные дни на протяжении полумесяца. Результаты обработки четырех серий измерений, каждая из которых длилась около трех часов и содержала 20 измерений, показали, что частота $\text{CO}_2/^{192}\text{OsO}_4$ репера (линия $P(14)$)

на $\lambda = 10,53$ мкм) в единицах атомной шкалы времени равна

$$\nu = 28\,464\,676\,938,5 \pm 1,0 \text{ кГц.}$$

4. Таким образом, впервые с относительной погрешностью $3 \cdot 10^{-11}$ измерено абсолютное значение частоты квантового репера на $\text{CO}_2/^{192}\text{OsO}_4$. Полученная точность измерения ограничена в основном собственной нестабильностью частоты $\text{CO}_2/^{192}\text{OsO}_4$ -лазера; известным образом [4, 5] она может быть увеличена еще на два порядка. Это позволит проводить абсолютные измерения частот лазеров, работающих на более коротковолновых переходах, практически с эталонной точностью. Определение абсолютных значений частоты $\text{CO}_2/^{192}\text{OsO}_4$ позволяет также использовать его в дальнейшем как хранитель частоты, с помощью которого можно проводить измерения частот лазеров ИК и видимого диапазона без использования лазеров субмиллиметрового диапазона для непрерывного синхронного контроля его частоты по эталону.

Прецизионные измерения абсолютного значения частоты $\text{CO}_2/^{192}\text{OsO}_4$ репера открывают принципиальную возможность сравнения частот квантовых переходов атомов и молекул, определяемых различным набором фундаментальных постоянных [6, 7], с целью проверки гипотезы [8] об изменении физических констант со временем (ожидаемое относительное их изменение за год составляет примерно $7 \cdot 10^{-11}$). Как известно [9], частота перехода между атомными подуровнями сверхтонкой структуры, обусловленной магнитным моментом ядра, выражается через такой набор констант

$$\omega_{\text{СТС}} \sim c g_I \alpha^2 R \frac{m_e}{m_p},$$

где g_I — гиромагнитное отношение протона, α — постоянная тонкой структуры, R — постоянная Ридберга, m_e и m_p — соответственно масса электрона и протона, c — скорость света. С другой стороны, частота колебательного перехода многоатомной молекулы [10]

$$\omega_{\text{КОЛ}} \sim \sqrt{k/M},$$

где M — приведенная масса атомов, образующих данную связь, k — квазиупругая постоянная. Последнюю можно выразить через известные константы: $kx^2 \sim E_e \sqrt{m_e/m_p}$, где x — амплитуда нормального колебания ($x \sim a_0$ — боровский радиус), E_e — электронная энергия ($E_e \sim R$). В результате, отношение частот сверхтонкого и колебательного переходов будет пропорционально

$$\frac{\omega_{\text{СТС}}}{\omega_{\text{КОЛ}}} \sim \frac{g_I e^4}{(c \hbar)^{3/2}} \left(\frac{m_e}{m_p} \right)^{1/4} = g_I e \alpha^{3/2} \left(\frac{m_e}{m_p} \right)^{1/4},$$

где e — заряд электрона, \hbar — постоянная Планка. Отсюда следует, что периодические измерения в течение достаточно длительного времени абсолютной частоты репера на колебательно-вращательном переходе молекулы с помощью атомного эталона времени при одновременном сличении частот однотипных генераторов между собой могут дать информацию об изменении со временем полученного набора констант.

Хотя предположение о непостоянстве физических констант противоречит общей и специальной теории относительности [8] и встречает ряд других серьезных возражений [11], окончательное решение вопроса даст все же только эксперимент. Проведенные абсолютные измерения частоты $\text{CO}_2/^{192}\text{Os O}_4$ -лазера кладут начало такому эксперименту.

Всесоюзный
Научно-исследовательский институт
физико-технических
радиотехнических измерений

Поступила в редакцию
12 июля 1979 г.

Институт спектроскопии
Академии наук СССР

Литература

- [1] К.М.Ивенсон, Ф.Р.Петерсон. Книга: Лазерная спектроскопия атомов и молекул, под ред. Г.Вальтера, из серии "Проблемы прикладной физики", перевод, М., изд. Мир, 1979.
- [2] K.M.Evenson, D.A.Jennings, F.R.Peterson, J.S.Wells. In: *Laser Spectroscopy III (Proceedings of the Third International Conference, Jackson Lake Lodge, Wyoming, USA, July 4 – 8, 1977)*, ed. by J.L.Hall and J.L.Carlsten, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, N-Y. 1977, p.65.
- [3] Ю.С.Домнин, В.М.Татаренков, П.С.Шумяцкий. *Квантовая электроника*, 2, 2612, 1975.
- [4] О.Н.Компанец, А.Р.Кукуджанов, В.С.Летохов, В.Г.Миногин, Е.Л.Михайлов. *ЖЭТФ*, 69, 32, 1975.
- [5] О.Н.Компанец, А.Р.Кукуджанов, Е.Л.Михайлов. *Квантовая электроника*, 4, 2016, 1977.
- [6] R.H.Dicke. *Science*, 129, 621, 1959.
- [7] Н.Г.Басов, В.С.Летохов. *УФН*, 96, 585, 1968.
- [8] P.A.M.Dirac. *Proc. Roy. Soc. London*, A165, 199, 1938.
- [9] И.И.Собельман. Введение в теорию атомных спектров. ФМЛ, 1963. стр. 261.
- [10] М.А.Ельяшевич. Атомная и молекулярная спектроскопия. ФМЛ, 1962, стр.611.
- [11] Я.Б.Зельдович. *УФН*, 78, 549, 1962.