

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ТРАНСПОРТИРУЕМОГО ОПТИЧЕСКОГО СТАНДАРТА ЧАСТОТЫ, СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ЛИНИЯМ МЕТАНА С ШИРИНОЙ В НЕСКОЛЬКО КИЛОГЕРЦ

Н.Г. Басов, М.А. Губин, В.В. Никитин, А.В. Никульчин, Е.Д. Проценко, Д.А. Тюрников, А.С. Шелковников

Создан малогабаритный He-Ne лазер, стабилизированный по разрешенной центральной компоненте МСТС $F_2^{(2)}$ линии метана, со стабильностью частоты $2 \cdot 10^{-14}$ ($\tau = 100$ с) и воспроизводимостью $\sim 10^{-13}$. С наивысшей в настоящее время точностью ($\approx 1 \cdot 10^{-12}$) определено собственное значение частоты этой компоненты в единицах шкалы частот, задаваемых первичным Cs-эталоном частоты.

Узкие спектральные линии, получаемые методами спектроскопии насыщения, широко используются для стабилизации частоты лазеров и создания оптических стандартов частоты. Большие успехи в этом направлении достигнуты с He-Ne лазером, стабилизированным по $F_2^{(2)}$ линии метана на длине волны 3,39 мкм. Предельное спектральное разрешение, полученное на этой линии, составляет ~ 1 кГц/1,2/ и ограничено в основном пролетным уширением. Воспроизводимость частоты стационарных установок по оценкам разных авторов достигает уровня $3 \cdot 10^{-14} - 10^{-12}$ /2,3/. Однако непосредственное сличение частот стационарных установок, созданных в различных лабораториях, до сих пор не представлялось возможным, т.к. транспортируемые лазеры не обеспечивали необходимой точности.

На рис. 1, взятом из работы /4/, показаны результаты сличений частот транспортируемых He-Ne/CH₄ лазеров, созданных в разных научных учреждениях. Сравнительно большой разброс (несколько кГц) обусловлен, видимо, тем, что все эти лазеры были стабилизированы по оптическим резонансам с шириной $\sim 10^5$ Гц, т.е. в условиях, когда магнитная сверхтонкая структура (МСТС) $F_2^{(2)}$ линии не разрешена.

До сих пор не существовало транспортируемого лазера, стабилизированного по компонентам МСТС этой линии, а все стационарные установки являлись уникальными и громоздкими сооружениями. Поэтому основная задача настоящей работы состояла в разработке компактного и легко транспортируемого He-Ne/CH₄ лазера, стабилизированного по разрешенным компонентам МСТС линии метана с воспроизводимостью частоты на уровне стационарных систем ($\sim 10^{-13}$).

В работах /5,6/ сообщалось об использовании двухмодового режима в газовом лазере для регистрации спектра насыщенной дисперсии ("частотных резонансов") и о преимуществах этого метода по сравнению с регистрацией резонансов насыщенного поглощения. Было показано, что при небольших габаритах двухмодового лазера можно получить высокое спектральное разрешение (~ 1 кГц) и высокое отношение сигнал/шум при выделении реперных линий в оптическом диапазоне. Это создало предпосылки для разработки транспортируемого оптического стандарта частоты (ТОСЧ) с воспроизводимостью, недостижимой ранее для подобных приборов.

По своей структуре созданный прибор повторяет прецизионный лазерный спектроскоп на основе двухмодовых He-Ne/CH₄ лазеров, описанный в /7/, и состоит из трех газовых лазеров и малогабаритной вакуумной системы (в одном блоке), трех высоковольтных источников питания лазеров и ряда электронных модулей, объединенных в два стандартных блока КБЧ-1.

Основу прибора составляет лазер с телескопом, работающий в двухмодовом режиме и служащий для получения узких резонансов насыщенной дисперсии. С целью уменьшения их ширины, определяемой ударным, пролетным и полевым уширением, приняты следующие меры: установлено давление в поглощающей ячейке $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст., световой луч в ячейке расширен до диаметра 30 мм, мощность генерации одной из мод (насыщающей центр линии поглощения) снижена до уровня 1–10 мкВт и стабилизирована специальным модулем, а метан в поглощающей ячейке охлажден до 77 К.

В созданном лазере получены оптические резонансы с шириной 4–6 кГц и отношением сигнал/шум $\sim 10^2$ в полосе 1 Гц. Стабилизация частоты осуществляется по четвертой производной резонансов насы-

щенной дисперсии, полученной модуляционным методом. На рис. 2 показана спектрограмма сигнала 4-ой производной резонансов, зарегистрированная с помощью автоматизированного измерительного комплекса. Из трех наблюдаемых компонент МСТС для стабилизации использовалась центральная.

Измерение сдвигов ТОСЧ в зависимости от различных параметров проводилось путем сравнения его частоты с частотой генерации стационарного лазера с телескопическим резонатором, описанного в /7/. Полученные зависимости совпали в пределах ошибки с более ранними результатами /7/.

Многokrратно проводился контрольный эксперимент по сличению частот двух независимо стабилизированных лазеров с телескопами при одинаковых параметрах: давлении метана, насыщающей мощности и индексе модуляции. Среднее значение их расстройки составило 18 ± 10 Гц. Причина наблюдаемого расхождения частот в настоящее время исследуется.

В конце 1985 года проводились метрологические испытания прибора, для чего использовался переносимый одномодовый He-Ne/CH₄ лазер ВНИИФТРИ, входящий в состав Единого Государственного эталона времени, частоты и длины СССР /8/. Частота одномодового стандарта измерялась как до, так и после испытаний с точностью лучше, чем 10^{-12} относительно первичного цезиевого стандарта частоты с помощью радиооптического моста ВНИИФТРИ /9/.

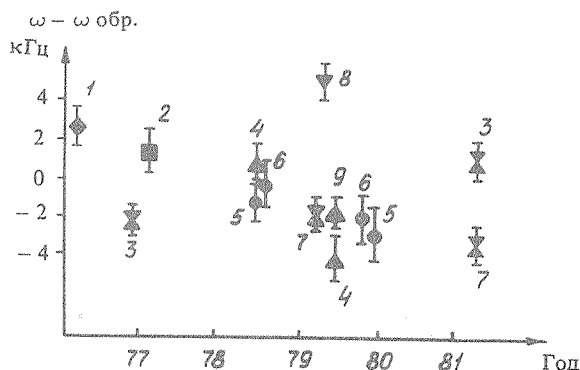


Рис. 1. Результаты сличений частот портативных лазеров с образцовой установкой ВНИИФТРИ в 1976–1981 г.г.: 1 – лазер СНИИМ (Новосибирск); 2 – лазер Физико-технического института (ФТИ); 3,7 – лазеры ВНИИФТРИ; 4,9 – лазеры Международного бюро мер и весов (Париж); 5,6 – лазеры Национальной физической лаборатории (Великобритания); 8 – лазер МИФИ – ФИАН.

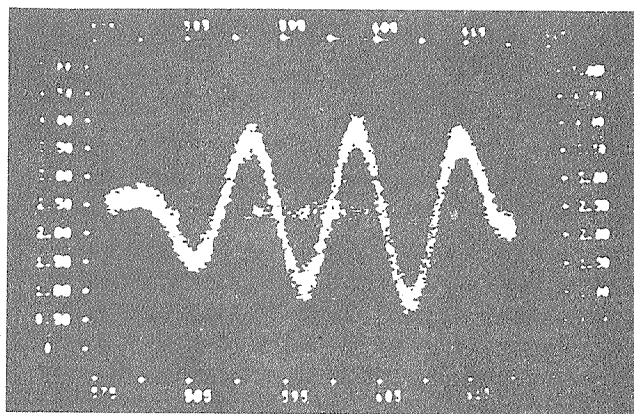


Рис. 2. Спектрограмма сверхтонкой структуры $F_2^{(2)}$ линии метана (4-я производная сигнала насыщенной дисперсии). Постоянная сглаживания 10 мс.

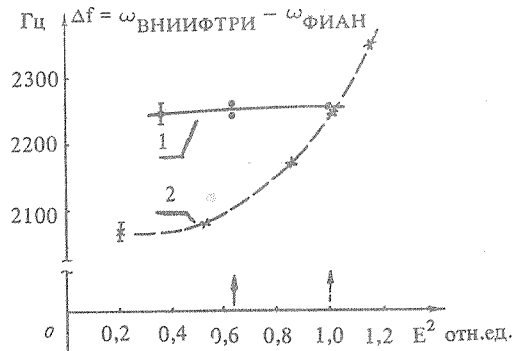


Рис. 3. Зависимости разности частот эталонного лазера ВНИИФТРИ (2) и транспортируемого двухмодового оптического стандарта частоты (1) при изменении мощности излучения каждого лазера. Стрелками обозначены реперные точки лазеров.

При испытаниях были получены следующие основные результаты:

1. Нестабильность частоты двухмодового ТОСЧ составила в относительном выражении величину не более $1 \cdot 10^{-13}$ при времени усреднения 10 с.

2. Сдвиги частоты в выбранной области основных параметров (мощность лазера, давление метана, девиация частоты) составили менее $\pm 5 \cdot 10^{-14}$ (стабилизация по 4-ой гармонике) при $\pm 10\%$ изменении перечисленных параметров.

3. Значение частоты двухмодового ТОСЧ, стабилизированного по вершине разрешенной центральной компоненты МСТС $F_2^{(2)}$ линии метана, отстоит от частоты одномодового стандарта ВНИИФТРИ на $-2,25 \pm \pm 0,04$ кГц.

На рис. 3 показаны зависимости сдвига частот двух лазеров от выходной мощности. Как и ожидалось, наклон сдвига для одномодового лазера, стабилизированного по резонансу с шириной $\sim 10^5$ Гц, более чем на порядок превышает наклон сдвига частоты для двухмодового лазера, стабилизированного по резонансу с шириной $\sim 6 \cdot 10^3$ Гц.

В результате испытаний впервые установлено, что абсолютное значение частоты центральной компоненты МСТС $F_2^{(2)}$ линии метана, воспроизводимой двухмодовым транспортируемым стандартом частоты, равно $88\,376\,181\,599\,903 \pm 90$ Гц ($F_2^{(2)}$ линия; компонента (7 \rightarrow 6)).

Ошибка измерения частоты лазера на длине волны 3,39 мкм является в настоящее время рекордно малой, однако она намного превышает повторяемость частоты прибора и определяется в основном точностными возможностями радиооптического моста и нестабильностью эталонного одномодового лазера.

Благодаря малым габаритам и массе, а также повышенной надежности прибора, появилась возможность непосредственного сличения шкал оптических частот, созданных в различных научных учреждениях, с точностью в 100 раз лучшей, чем ранее.

Прибор делает доступным проведение прецизионных спектроскопических измерений, а также ряда фундаментальных физических экспериментов для широкого круга исследователей.

Т а б л и ц а 1

Основные характеристики прибора

Частота излучения	88 316 787 599 903 \pm 90 Гц
Стабильность частоты (параметр Аллана) при времени усреднения 100 с	$2 \cdot 10^{-14}$
Диапазон прецизионной пересройки частоты	1 МГц
Габариты лазерного блока	2040X430X230 мм
Масса	75 кг

Авторы благодарны В.М. Татаренкову и Ю.С. Домнину за обсуждение и участие в метрологических испытаниях прибора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hall J. L., Borde C. J., Uehara K. Phys. Rev. Lett., 37, 1339 (1976).
2. Chebotayev V. P. Proc. 2nd Frequency Standards and Metrology Symp., USA, 1976, p. 385.
3. Кошеляевский Н. Б., Татаренков В. М., Титов А. Н. Измерительная техника, № 10, 57 (1976).
4. Татаренков В. М. Докторская диссертация, ВНИИФТРИ, М., 1982, с. 208.
5. Басов Н. Г. и др. Препринт ФИАН № 123, М., 1981.
6. Алексеев В. А. и др. Квантовая электроника, 11, 648 (1984).
7. Басов Н. Г. и др. Квантовая электроника, 10, 702 (1983).
8. Домнин Ю. С. и др. Измерительная техника, № 6, 7 (1986).
9. Домнин Ю. С. и др. Измерительная техника, № 6, 5 (1986).

Поступила в редакцию 8 августа 1986 г.