

Перспективы развития эталонной базы Российской Федерации в области измерений длины

Ю. Г. Захаренко, Н. А. Кононова, В. Л. Федорин, З. В. Фомкина, К. В. Чекирда

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: Y.G.Zacharenko@vniim.ru, N.A.Kononova@vniim.ru, V.L.Fedorin@vniim.ru, Z.V.Fomkina@vniim.ru, K.V.Chekirda@vniim.ru

Описаны результаты работ по созданию комплекса аппаратных средств высшей точности для воспроизведения и передачи единицы длины. Описан состав комплекса. Создание комплекса направлено на повышение научного и технологического уровня Российской Федерации и обеспечение единства измерений длины. Данный комплекс станет основой для дальнейшего развития эталонной базы Российской Федерации в области измерений длины и позволит осуществлять воспроизведение единицы длины на двух длинах волн – 633 и 532 нм, а также измерять длину волны в вакууме лазерных источников излучения в диапазоне 500–1050 нм.

Ключевые слова: государственный первичный эталон единицы длины – метра, частотно-стабилизированный лазер, оптическая частотная гребёнка.

Введение. С 2017 по 2019 гг. во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева проведены работы по развитию перспективных направлений совершенствования эталонной базы Российской Федерации в области измерений длины. С этой целью создан комплекс аппаратных средств высшей точности для воспроизведения и передачи единицы длины (далее – комплекс). В дальнейшем планируется включение данного комплекса в состав усовершенствованного Государственного первичного эталона единицы длины – метра ГЭТ 2-2010. В составе ГЭТ 2-2010 планируется использовать комплекс для воспроизведения единицы длины согласно рекомендациям Международного бюро мер и весов (BIPM), передачи единицы длины источникам излучения из состава высокоточных современных лазерных измерительных систем, а также для связи единицы длины с Государственным первичным эталоном единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2018.

В настоящее время ведущие метрологические институты мира, такие как PTB (Германия), NIST (США), NPL (Великобритания), NMIJ (Япония), применяют для воспроизведения и передачи единицы длины частотно-стабилизированные лазеры на различных длинах волн согласно рекомендациям BIPM [1], а также технику на основе оптической частотной гребёнки.

Комплекс аппаратных средств высшей точности для воспроизведения и передачи единицы длины. В состав комплекса входят:

- аппаратура для измерения частоты (длины волны в вакууме) лазеров в диапазоне длин волн 500–1050 нм (комб-генератор);

- комплект стабилизированного лазера на длине волны 633 нм;

- комплект стабилизированного лазера на длине волны 532 нм;

комплект аппаратуры передачи единицы длины.

Аппаратура для измерения частоты (длины волны в вакууме) лазеров. Комплекс аппаратуры для измерения частоты (длины волны в вакууме) лазеров в диапазоне длин волн 500–1050 нм представляет собой комб-генератор, создателями которого являются Д. Холл и Т. Хенш. Именно за это изобретение они получили Нобелевскую премию в 2005 г. [2, 3]. Частотное представление идеальной оптической частотной гребёнки – это последовательность дельта-функций, расположенных согласно выражению

$$f(n) = f_0 + nf_r, \quad (1)$$

где n – целое число; f_r – шаг гребёнки; f_0 – частота сдвига несущей частоты, которая меньше чем f_r .

Основным элементом предложенного Д. Холлом и Т. Хеншем комб-генератора является фемтосекундный лазер, работающий в режиме синхронизации мод. В частотном представлении такой лазер формирует эквидистантную оптическую частотную гребёнку узких спектральных компонентов. Причём интервал между компонентами равен частоте повторения импульсов. Такая оптическая частотная гребёнка может использоваться в качестве линейки в пространстве частот, которую можно применять для измерения больших интервалов между двумя различными оптическими частотами. Частотный спектр фемтосекундного лазера можно расширить с помощью использования микроструктурированного кварцевого волокна, обладающего большой нелинейностью, данное уширение превышает октавную полосу без нарушения целостности оптической частотной гребёнки [3].

В состав комплекса входит комб-генератор модели FC1500-250-WG фирмы Menlo Systems (Германия). Его использование в составе ГЭТ 2-2010 позволит измерять длину

**СКОДО выходного сигнала
частотой 5 МГц при полосе
пропускания 3 Гц**

Время измерений	СКОДО
1 с	$1,2 \cdot 10^{-13}$
10 с	$1,9 \cdot 10^{-14}$
100 с	$5,1 \cdot 10^{-15}$
1 ч	$1,2 \cdot 10^{-15}$
1 сут	$0,1 \cdot 10^{-15}$

не в одной точке, а в диапазоне 500–1050 нм. Связь комплекса с ГЭТ 1-2018 осуществляется посредством водородного стандарта частоты и времени Ч1-1003М, применяемого для создания высокостабильных спектрально чистых опорных сигналов. Сигнал стандарта частотой 5 МГц является опорным для комб-генератора и определяет его стабильность. Стабильность частоты выходного сигнала стандарта частотой 5 МГц характеризуется средним квадратическим относительным двухвыборочным отклонением (СКОДО) частоты при полосе пропускания 3 Гц и определяется для различных интервалов времени измерений. В процессе исследований комплекса стандарт частоты и времени Ч1-1003М поверен с применением оборудования из состава ГЭТ 1-2018. В таблице представлены результаты исследований водородного стандарта частоты и времени Ч1-1003М.

Для обработки результатов измерений, полученных с помощью комб-генератора, во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева разработано специализированное прикладное программное обеспечение «СОМВ-Лазер» [4].

Комплект стабилизированного лазера на длине волны 633 нм. Частотно-стабилизированный He–Ne/I₂-лазер модели 100 (Winters Electro-Optics, Inc., США) на длине волны 633 нм предназначен для воспроизведения единицы длины в соответствии с рекомендациями BIPM [1]. He–Ne/I₂-лазер модели 100 состоит из излучателя и электронного блока. Для стабилизации длины волны лазера на один из четырнадцати сверхтонких компонентов колебательно-вращательного перехода молекулярного йода в излучателе используется йодная ячейка внутри резонатора и лазерная трубка с одним окном Брюстера в сочетании с синхронным обнаружением третьей гармоники. Ячейка с йодом индивидуально откалибрована в BIPM. Все основные электронные модули расположены в электронном блоке, за исключением фотодетектора, который размещён в излучателе. Рассматриваемый лазер выполняет ряд функций, облегчающих работу по сравнению с традиционными йодными лазерами. Схема автосинхронизации позволяет быстро и точно получать выбранный пик и повторно получать тот же пик, если нарушается сервосинхронизация.

Исследования частотно-стабилизированного He–Ne/I₂-лазера проведены с помощью лазера и установки для измерений разности частот источников лазерного излучения, входящих в состав ГЭТ 2-2010 [5]. Для обеспечения автоматической регистрации разностной частоты лазера из состава ГЭТ 2-2010 (эталонного) и исследуемого частотно-стабилизированного He–Ne/I₂-лазера, обработки разностной частоты и определения частоты исследуемого лазера, а также для определения стабильности частоты

исследуемого лазера за различные промежутки времени во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева было разработано специализированное прикладное программное обеспечение «Лазер-Лазер» [4]. По результатам исследований можно сделать вывод, что относительная нестабильность частоты (длины волны в вакууме) лазерного излучения частотно-стабилизированного He–Ne/I₂-лазера модели 100 не превышает $2 \cdot 10^{-11}$.

Комплект стабилизированного лазера на длине волны 532 нм. В качестве стабилизированного лазера на длине волны 532 нм используется оптический стандарт ILP I2/532–3L, разработанный и изготовленный Институтом лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук [6–10]. Оптический стандарт состоит из частотно-стабилизированного перестраиваемого кольцевого Nd:YAG-лазера с внутрирезонаторным удвоением частоты, интерферометра Фабри-Перо, люминесцентной поглощающей ячейки, электронной системы автоматической подстройки частоты и блока питания. Излучение лазера на частоте второй гармоники заводится в интерферометр Фабри-Перо и поглощающую люминесцентную йодную ячейку. Интерферометр используется для получения узкой линии излучения лазера. Для этого лазер с помощью электронной системы автоматического регулирования стабилизируется по максимуму полосы пропускания интерферометра на длине волны 532 нм. Для стабилизации частоты лазера по интерферометру используется метод Паунда–Древера–Холла. В поглощающей люминесцентной ячейке наблюдаются резонансы насыщенного поглощения в молекулярном йоде. Частота интерферометра Фабри-Перо и лазера стабилизируется по сигналу третьей гармоники резонанса насыщенного поглощения компонента сверхтонкой структуры в I₂ с помощью системы автоматической подстройки частоты. Стандарт стабилизируется по частоте компонентов сверхтонкой структуры линии R(56) 32-0 поглощения молекулярного йода.

Исследования оптического стандарта производили с использованием комб-генератора. Относительная нестабильность воспроизведения частоты (длины волны в вакууме) не превышает $9 \cdot 10^{-12}$.

Выводы. Создание уникального комплекса аппаратных средств высшей точности для воспроизведения и передачи единицы длины и включение его в состав усовершенствованного Государственного первичного эталона единицы длины – метра ГЭТ 2-2010 позволит производить единицу на длине волны 532 нм, а также измерять длину волны в вакууме лазерных источников излучения в диапазоне 500–1050 нм. Усовершенствованный ГЭТ 2-2010 позволит сохранить метрологический суверенитет Российской Федерации. Дальнейшее развитие эталонной базы связано с применением новейших достижений науки и техники, таких как ультрастабильные лазеры и комб-генераторы.

Список литературы

1. Recommended values of standard frequencies for applications including the practical realization of the metre and

secondary representations of the second. 2016. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies.html> (дата обращения: 15.10.2019).

2. Холл Дж. Л. Определение и измерение оптических частот: перспективы оптических часов – и не только // Успехи физических наук. 2006. Т. 176. № 12. С. 1353–1367. DOI: 10.3367/UFNr.0176.200612i.1353

3. Хэнш Т. В. Страсть к точности // Успехи физических наук. 2006. Т. 176. № 12. С. 1368–1380. DOI: 10.3367/UFNr.0176.200612j.1368

4. Захаренко Ю. Г., Кононова Н. А., Фомкина З. В., Чекирда К. В., Лукин А. Я. Разработка прикладного программного обеспечения для комплекса аппаратных средств высшей точности для воспроизведения и передачи единицы длины // Приборы. 2018. № 12 (222). С. 42–47.

5. Александров В. С., Захаренко Ю. Г., Кононова Н. А., Лейбенгардт Г. И., Федорин В. Л., Чекирда К. В. Государственный первичный эталон единицы длины – метра ГЭТ 2-2010 // Измерительная техника. 2012. № 6. С. 3–7.

6. Денисов В. И., Игнатович С. М., Квашнин Н. Л., Скворцов М. Н., Фарносов С. А. Прецизионная модуляция лазерного излучения акустооптическим модулятором для стабилизации Nd:YAG-лазера по оптическим резонансам в молекулярном йоде // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 5. С. 464–467.

7. Скворцов М. Н., Охупкин М. В., Невский А. Ю., Багаев С. Н. Оптический стандарт частоты на основе Nd:YAG-лазера, стабилизированного по резонансам насыщенного поглощения в молекулярном йоде с использованием второй гармоники излучения // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. № 12. С. 1101–1106.

8. Peter Jungner, Mark L. Eickhoff, Steve D. Swartz, Jun Ye, John L. Hall, S. Waltman, *SPIE*, 1995, vol. 2378, pp. 22–34. DOI: 10.1117/12.208229

9. Holzwarth R., Nevsky A. Yu., Zimmermann M., Udem Th., Hansch T. W., Von Zanthier J., Walther H., Knight J. C., Wadsworth W. J., Russell P. St. J., Skvortsov M. N., Bagayev S. N., *Applied Physics B*, 2001, vol. 73, pp. 269–271. DOI: 10.1007/s003400100633

10. Игнатович С. М., Квашнин Н. Л., Скворцов М. Н. Сдвиг частоты йодного оптического стандарта частоты

в зависимости от величины пробной модуляции частоты излучения, давления и температуры газа в поглощающей ячейке // Квантовая электроника. 2018. Т. 48. № 10. С. 973–976.

References

1. *Recommended values of standard frequencies for applications including the practical realization of the metre and secondary representations of the second*, 2016, available at: <http://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies.html> (accessed: 15.10.2019).

2. Kholm Dzh. L., *Physics-Uspekhi*, 2006, vol. 176, no. 12, pp. 1353–1367 (in Russian). DOI: 10.3367/UFNr.0176.200612i.1353

3. Khehnsht T. V., *Physics-Uspekhi*, 2006, vol. 176, no. 12, pp. 1368–1380 (in Russian). DOI: 10.3367/UFNr.0176.200612j.1368

4. Zakharenko Yu. G., Kononova N. A., Fomkina Z. V., Chekirda K. V., Lukin A. Ya., *Pribory*, 2018, no. 12 (222), pp. 42–47 (in Russian).

5. Aleksandrov V. S., Zakharenko Yu. G., Kononova N. A., Leibengardt G. I., Fedorin V. L., Chekirda K. V., *Measurement Techniques*, 2012, vol. 55, no. 6, pp. 595–602. DOI: 10.1007/s11018-012-0007-y

6. Denisov V. I. et al., *Quantum Electronics*, 2016, no. 46(5), p. 464, DOI: 10.1070/QEL16015

7. Skvortsov M. N. et al., *Quantum Electronics*, 2004, no. 34 (12) pp. 1101–1106. DOI: 10.1070/QE2004v034n12ABEH002851

8. Peter Jungner, Mark L. Eickhoff, Steve D. Swartz, Jun Ye, John L. Hall, S. Waltman, *SPIE*, 1995, vol. 2378, pp. 22–34. DOI: 10.1117/12.208229

9. Holzwarth R., Nevsky A. Yu., Zimmermann M., Udem Th., Hansch T. W., Von Zanthier J., Walther H., Knight J. C., Wadsworth W. J., Russell P. St. J., Skvortsov M. N., Bagayev S. N., *Applied Physics B*, 2001, vol. 73, pp. 269–271. DOI: 10.1007/s003400100633

10. Ignatovich S. M. et al., *Quantum Electronics*, 2018, no. 48 (10), p. 973. DOI: 10.1070/QEL16609

Дата поступления: 08.11.2019.

Дата принятия: 28.11.2019.

Prospects of development of the reference base of the Russian Federation in the field of length measurements

Y. G. Zakharenko, N. A. Kononova, V. L. Fedorin, Z. V. Fomkina, K. V. Chekirda

D. I. Mendeleyev Institute for Metrology VNIIM, St. Petersburg, Russia, e-mail: Y.G.Zakharenko@vniim.ru, N.A.Kononova@vniim.ru, V.L.Fedorin@vniim.ru, Z.V.Fomkina@vniim.ru, K.V.Chekirda@vniim.ru

The results of the work to create a complex of high-precision hardware for the unit of length reproduction and transferring carried out at “D. I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM)” are represented. This complex will serve as the basis for the further development of the reference base of the Russian Federation in the field of length measurements and will allow reproduction of the unit of length at two wavelengths of 633 nm and 532 nm, as well as measurements of the wavelength of laser sources in vacuum in the range from 500 to 1050 nm.

Key words: state primary standard of the unit of length – meter, frequency stabilized laser, optical frequency comb.