

Научная статья

УДК 53.082.54

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-7-18-23>

Современное состояние эталонной базы Российской Федерации в области измерений длины и угла

Юрий Гордеевич Захаренко¹, Наталья Александровна Кононова², Марина Андреевна Космина³, Зоя Викторовна Фомкина⁴✉, Константин Владимирович Чекирда⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия

¹Y.G.Zackharenko@vniim.ru, ²N.A.Kononova@vniim.ru, ³m.a.kosmina@vniim.ru, ⁴Z.V.Fomkina@vniim.ru✉, ⁵K.V.Chekirda@vniim.ru

Аннотация. Представлено современное состояние эталонной базы Российской Федерации в области измерений длины и угла. Приведены описание и основные метрологические характеристики Государственного первичного эталона единицы длины – метра ГЭТ 2-2021 и Государственного первичного эталона единицы плоского угла ГЭТ 22-2014. Освещены возможности ВНИИМ им. Д. И. Менделеева по проведению калибровки, испытаниям в целях утверждения типа, поверке и аттестации современных высокоточных средств измерений длины и плоского угла, принцип действия которых основан на использовании стабилизированных источников лазерного излучения. На сегодняшний день ГЭТ 2-2021 обеспечивает передачу единицы длины источникам лазерного излучения в диапазоне длин волн 500–1050 нм с помощью состоящего из оптической частотной гребенки и водородного стандарта частоты комплекса аппаратуры и лазерным измерительным системам в диапазоне $1 \cdot 10^{-9}$ –30 м с применением лазерных интерференционных компараторов. ГЭТ 22-2014 обеспечивает передачу единицы плоского угла лазерным измерительным системам в диапазоне 0–360° с помощью поворотного стола и цифровых автоколлиматоров. Обоснована необходимость прослеживаемости источников лазерного излучения и лазерных измерительных систем к государственным первичным эталонам. Рассмотрены дальнейшие перспективы развития эталонной базы в области измерений длины и угла.

Ключевые слова: государственный первичный эталон единицы длины, государственный первичный эталон единицы плоского угла, воспроизведение единицы, передача единицы, частотно-стабилизированные лазеры, оптическая частотная гребенка, лазерные измерительные системы

Для цитирования: Захаренко Ю. Г., Кононова Н. А., Космина М. А., Фомкина З. В., Чекирда К. В. Современное состояние эталонной базы Российской Федерации в области измерений длины и угла // Измерительная техника. 2022. № 7. С. 18–23. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-7-18-23>

The current state of the reference base of the Russian Federation in the field of length and angle measurements

Yuri G. Zackharenko¹, Natalia A. Kononova², Marina A. Kosmina³, Zoya V. Fomkina⁴✉, Konstantin V. Chekirda⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} D. I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM), St. Petersburg, Russia

¹Y.G.Zackharenko@vniim.ru, ²N.A.Kononova@vniim.ru, ³m.a.kosmina@vniim.ru, ⁴Z.V.Fomkina@vniim.ru✉, ⁵K.V.Chekirda@vniim.ru

Abstract. The current state of the reference base of the Russian Federation in the field of length and angle measurements is presented. The description and main metrological characteristics of the State Primary Standards of the unit of length – meter GET 2-2021 and the unit of plane angle GET 22-2014 are given. The possibilities of D. I. Mendeleyev Institute for Metrology for carrying out calibration, testing for type approval, verification and certification of modern high-precision measuring equipment of length and plane angle, which are based on stabilized laser radiation sources, are described. To this date, the State Primary Standard of the unit of length – meter GET 2-2021 provides transferring of the unit of length to laser radiation sources in the wavelength range from 500 to 1050 nm by the optical frequency comb with hydrogen frequency standard, and laser measuring systems in the range from $1 \cdot 10^{-9}$ to 30 m by the complex of laser interference comparators. The State Primary Standard of the unit of plane angle GET 22-2014 provides transferring of plane angle to such systems in the range from 0 to 360° using a rotary table and digital autocollimators. The necessity of traceability of laser radiation sources and laser measuring systems to State primary standards is substantiated. Further prospects for the development of the reference base in the field of length and angle measurements are considered.

Keywords: State Primary Standard of the unit of length, State Primary Standard of the unit of plane angle, realization of the unit, transferring of the unit, stabilized laser, optical comb generator, laser measuring systems

Введение. В настоящее время в мире наблюдается постоянный рост требований к точности измерений в науке и промышленности, это вызвано необходимостью повышения

качества производимой продукции и оказываемых услуг. Одним из самых высокоточных методов передачи единиц длины и плоского угла является метод лазерной интерферометрии,

который и положен в основу большинства современных лазерных измерительных систем. В связи с этим в последние десятилетия в мире всё более широкое применение получили стабилизированные источники лазерного излучения и измерительные системы на их основе. Стабилизированные лазеры и лазерные измерительные системы используют для решения множества научных и технических задач и широко применяют в ряде важнейших отраслей национальной промышленности – аэрокосмической, энергетической, судостроительной, оборонной и в машиностроении.

В метрологических центрах многих научно-исследовательских институтов и передовых производственных предприятий используют в качестве рабочих эталонов и средств измерений стабилизированные лазеры, прецизионные и промышленные лазерные интерферометры, лазерные сканеры и другие лазерные измерительные системы.

Так как единица длины – одна из основных единиц физических величин и входит в ряд производных единиц, то и реализация воспроизведения многих производных единиц невозможна без применения средств хранения и передачи единицы длины. Стабилизированные лазеры и лазерные измерительные системы в качестве источников лазерного излучения входят в состав таких государственных первичных и вторичных эталонов единиц величин, как Государственный первичный эталон единицы плоского угла ГЭТ 22-2014, Государственный первичный эталон единицы температурного коэффициента линейного расширения твёрдых тел ГЭТ 24-2018, Государственный первичный специальный эталон единицы длины в области измерений параметров отклонений от плоскостности оптических поверхностей ГЭТ 183-2019, Государственный первичный специальный эталон единицы длины в области измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности ГЭТ 130-2019 и др.

Наиболее известные производители лазеров и лазерных измерительных систем – компании Thorlabs Inc. (США), SIOS Messtechnik GmbH (Германия), Renishaw plc. (Великобритания), Automated Precision Inc. (США), Hewlett Packard (США), FARO Swiss Holding GmbH (Швейцария) и др. Многие зарубежные компании уходят с российского рынка, но на смену им приходят Chotest Technology Inc. (Китайская Народная Республика), Lasertex Co. Ltd. (Польша), Hexagon Metrology GmbH (Германия) и др. В связи с актуальностью импортозамещения в ближайшее время ожидается появление на рынке источников лазерного излучения и лазерных измерительных систем отечественного производства. Таким образом, наиболее важными становятся вопросы обеспечения прослеживаемости к ГЭТ 2-2021 и ГЭТ 22-2014, исследований метрологических характеристик, разработки методик калибровки, проведения испытаний в целях утверждения типа средств измерений и внесения информации о них в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений Российской Федерации, дальнейшей поверки средств измерений.

Государственный первичный эталон единицы длины – метра ГЭТ 2-2021. Воспроизведение, хранение и передача

единицы длины в Российской Федерации осуществляются с помощью Государственного первичного эталона единицы длины – метра ГЭТ 2-2021.

В соответствии с Рекомендацией Международного комитета мер и весов [1] единицу длины можно воспроизводить частотно-стабилизированными источниками лазерного излучения с различными длинами волн. Наиболее востребованы в метрологии лазеры, работающие на длинах волн 633 и 532 нм. Именно такие источники лазерного излучения входят в большинство национальных первичных эталонов во всём мире. До 2021 г. единицу длины воспроизводили на Государственном первичном эталоне единицы длины ГЭТ 2-2010 [2] на одной длине волны 633 нм с помощью стабилизированного по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде $^{127}\text{He-Ne/I}_2$ -лазера, разработанного во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. Среднее квадратическое отклонение (СКО) воспроизведения единицы длины данным источником при 100 независимых измерениях составляет $1,6 \cdot 10^{-12}$.

В настоящее время единица длины на длине волны 633 нм воспроизводится с помощью двух источников. Второй источник производства фирмы Winters Electro-Optics, Inc. (США) – транспортируемый [3]. Это позволяет передавать единицу длины стационарным источникам излучения, входящим в состав государственных первичных и вторичных эталонов, а также других измерительных установок. Таким образом, передавать единицу длины можно непосредственно на месте применения эталонов с СКО не более $6,2 \cdot 10^{-12}$.

Источники лазерного излучения с длиной волны 633 нм и системы на их основе уже на протяжении многих лет применяют в различных областях науки и техники, однако в последние годы всё более востребованными становятся источники лазерного излучения, работающие на других длинах волн. Например, в таких областях, как гравиметрия, широко применяют лазеры с длиной волны 532 нм. В связи с появлением новых высокостабильных источников лазерного излучения с различными длинами волн остро встал вопрос об обеспечении единства измерений и прослеживаемости указанных источников к государственным первичным эталонам. В состав ГЭТ 2-2021 включены установки, позволяющие обеспечивать воспроизведение и передачу единицы длины в более широком диапазоне [4, 5]. На сегодняшний день воспроизведение единицы ГЭТ 2-2021 происходит на двух длинах волн 633 и 532 нм. Единица длины на длине волны 532 нм воспроизводится с помощью стабилизированного по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде $^{127}\text{Nd:YAG}$ -лазера (Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, ИЛФ СО РАН) [6–10]. СКО воспроизведения единицы длины данным источником при 100 независимых измерениях составляет $1,3 \cdot 10^{-12}$.

Единица длины передаётся источникам лазерного излучения на длинах волн 633 и 532 нм с помощью установки для измерений разности частот источников лазерного излучения методом оптического гетеродинамирования. Внешний

вид установки для измерений разности частот приведён на официальном сайте ВНИИМ им. Д. И. Менделеева¹.

Для передачи единицы в более широком диапазоне длин волн используется комплекс аппаратуры для измерения частоты (длины волны в вакууме) лазеров в диапазоне длин волн 500–1050 нм (далее – комплекс) из состава ГЭТ 2-2021. В основу комплекса положено применение такой передовой технологии, как оптическая частотная гребёнка фирмы Menlo Systems GmbH (Германия) [11–13], за которую её создатели Джон Холл и Теодор Хенш в 2005 г. получили Нобелевскую премию. Подобные комплексы входят в состав первичных эталонов единицы длины ведущих национальных институтов всего мира. Для улучшения метрологических характеристик оптической частотной гребёнки опорный сигнал формируется с помощью водородного стандарта частоты и времени Ч1-1003М (ЗАО «Время-Ч», Россия). Результаты исследований водородного стандарта частоты и времени Ч1-1003М показали, что среднее квадратическое относительное двухвыборочное отклонение частоты выходного сигнала 5 МГц при полосе пропускания 3 Гц за 1 с не превышает $2,0 \cdot 10^{-13}$, за 10 с – $3,0 \cdot 10^{-14}$, за 100 с – $7,0 \cdot 10^{-15}$. Водородный стандарт частоты и времени Ч1-1003М проходит ежегодные поверку и калибровку с помощью оборудования из состава Государственного первичного эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2022, тем самым обеспечивая связь единицы длины с ГЭТ 1-2022. Внешний вид комплекса аппаратуры для измерения частоты (длины волны в вакууме) лазеров в диапазоне длин волн 500–1050 нм также приведён на сайте ВНИИМ им. Д.И. Менделеева.

Передача единицы длины высокоточным лазерным системам на основе источников лазерного излучения в диапазоне $1 \cdot 10^{-9}$ –30 м осуществляется с помощью четырёх лазерных интерференционных компараторов с различными диапазонами измерений.

Структурная схема ГЭТ 2-2021 приведена на рисунке.



Структурная схема ГЭТ 2-2021

Block diagram of the GET 2-2021

Государственный первичный эталон единицы плоского угла ГЭТ 22-2014. Воспроизведение, хранение и передача единицы плоского угла в Российской Федерации происходит с помощью Государственного первичного эталона единицы плоского угла ГЭТ 22-2014.

ГЭТ 22-2014 обеспечивает воспроизведение и передачу единицы плоского угла в диапазоне 0 – 360° в статическом и динамическом режимах [14, 15]. В состав ГЭТ 22-2014 входят: интерференционный экзаменатор, три цифровых автоколлиматора, две призмы с различным количеством граней, измерительный поворотный стол, углоизмерительный комплекс для передачи единицы плоского угла геодезическим средствам измерений и углоизмерительный стенд для передачи единицы плоского угла динамическим средствам измерений угла. СКО воспроизведения единицы плоского угла при 10 независимых измерениях в статическом режиме ГЭТ 22-2014 составляет $0,005''$, в динамическом режиме при угловом перемещении с угловой скоростью $0,1$ – 60 мин^{-1} – $0,01''$.

Единица плоского угла передаётся современным высокоточным лазерным измерительным системам, оснащённым оптикой для измерений угловых величин, с помощью измерительного поворотного стола и цифровых автоколлиматоров из состава ГЭТ 22-2014. Общий вид измерительного поворотного стола и цифровых автоколлиматоров показан на официальном сайте ВНИИМ им. Д. И. Менделеева².

Передача единицы длины стабилизированным источникам лазерного излучения и системам на их основе. В связи со стремительным развитием лазерных технологий лазерные источники излучения нашли применение в различных областях науки и техники, на производстве, в спектроскопии, микроскопии, геодезии и картографии, сфере коммуникаций и т. д. В сфере фундаментальных научных исследований в области измерений длины и производных величин особый интерес представляют стабилизированные источники лазерного излучения метрологического назначения.

Приведём метрологические характеристики некоторых источников лазерного излучения: относительная нестабильность частоты гелий-неонового стабилизированного лазера ЛГН-303 (ОАО «Плазма», Россия) составляет $1 \cdot 10^{-8}$, частотно-стабилизированного He–Ne-лазера SL 02/1 (SIOS Meßtechnik GmbH, Германия) и гелий-неонового стабилизированного лазера Thorlabs HRS015 (Thorlabs Inc., США) – $2 \cdot 10^{-8}$, номинальное значение длины волны в вакууме лазерного излучения указанных лазеров составляет 633 нм.

Представленные точностные характеристики источников лазерного излучения соответствуют уровню рабочих эталонов 1-го разряда в соответствии с первой частью Государственной поверочной схемы для средств измерений длины в диапазоне от $1 \cdot 10^{-9}$ до 100 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм³ (ГПС) и должны прослеживаться к ГЭТ 2-2021.

¹ ВНИИМ. ГЭТ 2-2021 [Сайт]. URL: <https://www.vniim.ru/get2.html> (дата обращения: 21.06.2022).

² ВНИИМ. ГЭТ 22-2014 [Сайт]. URL: <https://www.vniim.ru/get22.html> (дата обращения: 21.06.2022).

³ Приказ Росстандарта № 2840 от 29.12.2018 г. «Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений длины в диапазоне от $1 \cdot 10^{-9}$ до 100 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм».

Единица длины источникам лазерного излучения на длинах волн 633 и 532 нм передаётся с помощью установки из состава ГЭТ 2-2021. Установка расположена на оптической сотовой плите, установленной на виброзащитных опорах. В ходе работы измеряются разностная частота лазера и компонент линии поглощения эталонного лазера. Полученные данные обрабатывают с применением прикладного программного обеспечения «Лазер-Лазер» [16]. В результате находят частоту (длину волны в вакууме) и относительную нестабильность длины волны в вакууме лазерного излучения измеряемого лазера.

Источники лазерного излучения 1-го разряда в комплекте с аналогичными установками можно применять в качестве рабочих эталонов в научно-метрологических институтах, центрах стандартизации и других метрологических лабораториях для передачи единицы длины источникам лазерного излучения на местах. Например, в 2016 г. ВНИИМ им. Д. И. Менделеева разработал и изготовил подобную установку для Всероссийского научно-исследовательского института метрологической службы (ВНИИМС).

В диапазоне 500–1050 нм передача единицы длины источникам лазерного излучения происходит с помощью оптической частотной гребёнки. В процессе измерений определяют частоту повторения импульсов оптической частотной гребёнки, частоту смещения несущей относительно огибающей и частоту биений с измеряемым лазером. Полученные данные обрабатывают с помощью программного обеспечения «СОВМ-Лазер» [16].

К современным лазерным измерительным системам (ЛИС) относятся такие средства измерений, как интерферометры, трекары, мобильные координатно-измерительные машины и др. Основные метрологические характеристики таких систем приведены в таблице (ΔL , $\Delta\varphi$ – пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений соответственно линейных и угловых перемещений). Номинальное значение длины волны лазерного излучения всех представленных лазерных измерительных систем составляет 633 нм.

Точностные характеристики лазерных измерительных систем, предназначенных для измерений длины, соответствуют уровню рабочих эталонов 2-го разряда в соответствии со второй и третьей частями ГПС и должны прослеживаться к ГЭТ 2-2021.

Передача единицы длины лазерным измерительным системам происходит в несколько этапов и включает в себя определение длины волны лазерного излучения и отклонений измеренных значений линейных перемещений от действительных значений. Длину волны лазерного излучения находят согласно процедуре передачи единицы длины для лазеров.

Отклонение измеренных значений линейных перемещений от действительных значений определяют с помощью компаратора универсального интерференционного метрового в диапазоне 0–1 м и компаратора лазерного интерференционного тридцатиметрового из состава ГЭТ 2-2021 в большем диапазоне. Перед измерениями подготавливают систему к работе в соответствии с требованиями эксплуатационной документации, собирают оптическую схему системы, подключают компьютер с программным обеспечением и блок измерений параметров окружающей среды, юстируют системы. Измерения производят с помощью специализированного программного обеспечения Interferometer.

Большинство лазерных измерительных систем оснащены оптикой и поворотными устройствами, позволяющими измерять угловые перемещения относительно поперечной и вертикальной осей и угол поворота относительно продольной оси. Сегодня всё большее количество производственных предприятий используют подобное оборудование для настройки и юстировки станков. Многие метрологические центры применяют лазерные измерительные системы для калибровки координатно-измерительных машин, поэтому кроме прослеживаемости к ГЭТ 2-2021 такие системы должны прослеживаться к ГЭТ 22-2014.

Отклонения измеренных значений угловых перемещений от действительных значений определяют с помощью измерительного поворотного стола и автоколлиматоров из состава ГЭТ 22-2014. СКО передачи единицы плоского угла при этом не превышает 0,1".

Работы по передаче единиц длины и плоского угла с каждым годом становятся всё более востребованными, метрологические лаборатории предприятий оснащают современным оборудованием. За последние пять лет в научно-исследовательском отделе геометрических измерений ВНИИМ им. Д. И. Менделеева количество источников лазерного излучения и систем лазерных измерительных, поступающих на поверку и калибровку, выросло более чем в два раза. Также в последние годы активно проводятся испытания в целях утверждения типа лазерных измерительных систем,

Метрологические характеристики лазерных измерительных систем

ЛИС	Изготовитель	ΔL , мкм	$\Delta\varphi$, **
XL-80	Renishaw plc., Великобритания	$\pm(0,005+0,5L)$	$\pm(0,002A+0,1+0,02M)$
XM-60	Renishaw plc., Великобритания	$\pm(0,02+0,5L)$	$\pm(0,006A+0,1+0,02M)$ (тангаж, рысканье) $\pm(0,01A+1,82)$ (смещение относительно продольной оси)
Серия SJ6000	Chotest Technology Inc., Китайская Народная Республика	$\pm(0,02+0,5L)$	$\pm(0,002A+0,1+0,25M)$
APIXD	Automated Precision Inc., США	$\pm(0,02+0,5L)$	$\pm(1,0+0,1M)$
Интерферометры лазерные НПИ-3D	Lasertex Co. Ltd., Польша	$\pm(0,02+0,4L)$	–

Примечание. L – измеряемое перемещение, м; A – угловое перемещение (либо смещение относительно продольной оси), угловые секунды; M – расстояние от лазерного блока до отражателя (либо до приёмника), м; * – для ЛИС с комплектом оптики для измерений угловых перемещений.

разрабатываются новые методики поверки и калибровки. В период 2019–2021 гг. с целью обеспечения источников лазерного излучения и систем на их основе актуальной нормативной базой для проведения работ по калибровке во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева разработаны и утверждены следующие документы:

СК 03-251-02/21-Т «Методика калибровки. Источники лазерного излучения с длиной волны 633 нм»;

СК 03-251-46/21-Т «Методика калибровки. Источники лазерного излучения с длиной волны 532 нм»;

СК 03-251-33/19-Т «Методика калибровки. Системы лазерные измерительные (линейные измерения)»;

СК 03-251-34/19-Т «Методика калибровки. Системы лазерные измерительные (угловые измерения)».

Заключение. Современное состояние эталонной базы Российской Федерации в области измерений длины и угла полностью соответствует запросам отечественного производства и науки по передаче единицы длины стабилизированным источникам лазерного излучения, а также по передаче единиц длины и угла лазерным измерительным системам. Однако в связи с тем, что большинство лазерных систем имеют существенные конструктивные отличия, открытыми остаются вопросы по разработке и оснащению государственных первичных эталонов различными вспомогательными устройствами для передачи единиц длины и угла. Такие работы постоянно ведутся во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева в рамках мероприятий по содержанию государственных первичных эталонов.

Список источников

1. Recommended values of standard frequencies for applications including the practical realization of the metre and secondary representations of the second. 2016. [Электрон. ресурс]. URL: <https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies> (дата обращения: 05.04.2022).

2. 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.

3. Kononova N. A., Zakharenko Yu. G., Fedorin V. L., Fomkina Z. V., 2018 *International Conference Laser Optics (ICLO)*, p. 371. <https://doi.org/10.1109/LO.2018.8435561>

4. Захаренко Ю. Г., Кононова Н. А., Федорин В. Л., Фомкина З. В., Чекирда К. В. Перспективы развития эталонной базы Российской Федерации в области измерений длины // Измерительная техника. 2020. № 2. С. 3–5. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-2-3-5>

5. Акимова Т. П., Захаренко Ю. Г., Кононова Н. А., Федорин В. Л., Фомкина З. В., Чекирда К. В. Государственный первичный эталон единицы длины – метра ГЭТ 2-2021 // Измерительная техника. 2021. № 10. С. 3–7. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-10-3-7>

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., Охалкин 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.

<https://doi.org/10.1070/QE2004v034n12ABEH002851>

8. Jungner P., Eickhoff M. D., Swartz St. D., Ye Jun, Hall J. L., Waltman St. B., *Proc. SPIE*, 1995, vol. 2378, pp. 22–34. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1007/s003400100633>

10. Игнатович С. М., Квашнин Н. Л., Скворцов М. Н. Сдвиг частоты иодного 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.

11. Холл Дж. Л. Определение и измерение оптических частот: перспективы оптических часов – и не только // Успехи физических наук. 2006. Т. 176. № 12. С. 1353–1367. <https://doi.org/10.3367/UfNr.0176.200612i.1353>

12. Хэнш Т. В. Страсть к точности // Успехи физических наук. 2006. Т. 176. № 12. С. 1368–1380. <https://doi.org/10.3367/UfNr.0176.200612j.1368>

13. Ye J., Schnatz H., Hollberg L. W., *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2003, vol. 9, no. 4, pp. 1041–1058. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2003.819109>

14. Чекирда К. В., Космина М. А., Лейбенгардт Г. И., Шур В. Л., Лукин А. Я. Совершенствование государственного первичного эталона плоского угла // Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях. СУДОМЕТРИКА-2014: Тез. докл. 2014. С. 157–159.

15. Чекирда К. В., Шур В. Л., Лукин А. Я. Исследование нового государственного первичного эталона плоского угла // Метрология времени и пространства: Материалы VIII Международного симпозиума. 2016. С. 182–184.

16. 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.

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: <https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies> (accessed: 05.04.2022).

2. Alexandrov V. S., Zakharenko Yu. G., Kononova N. A., Leibengardt G. I., Fedorin V. L., Chekirda K. V., *Measurement Techniques*, 2012, vol. 55, pp. 595–602. <https://doi.org/10.1007/s11018-012-0007-y>
3. Kononova N. A., Zakharenko Yu. G., Fedorin V. L., Fomkina Z. V., *2018 International Conference Laser Optics (ICLO)*, p. 371. <https://doi.org/10.1109/LO.2018.8435561>
4. Zakharenko Yu. G., Kononova N. A., Fedorin V. L., Fomkina Z. V., Chekirda K. V., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 63, pp. 77–80. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01753-9>
5. Akimova T. P., Zakharenko Yu. G., Kononova N. A., Fedorin V. L., Fomkina Z. V., Chekirda K. V., *Measurement Techniques*, 2022, vol. 64, pp. 789–793. <https://doi.org/10.1007/s11018-022-02005-8>
6. Denisov V. I., Ignatovich S. M., Kvashnin N. L., Skvortsov M. N., *Quantum Electronics*, 2016, vol. 46, no. 5, pp. 464–467. <https://doi.org/10.1070/QEL16015>
7. Skvortsov M. N., Okhapkin M. N., Nevskii A. Yu., Bagayev S. N., *Quantum Electronics*, 2004, vol. 34, no. 12, pp. 1101–1106. <https://doi.org/10.1070/QE2004v034n12ABEH002851>
8. Jungner P., Eickhoff M. D., Swartz St. D., Ye Jun, Hall J. L., Waltman St. B., *Proc. SPIE*, 1995, vol. 2378, pp. 22–34. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1007/s003400100633>
10. Ignatovich S. M., Kvashnin N. L., Skvortsov M. N., *Quantum Electronics*, 2018, vol. 48, no. 10, pp. 973–976. <https://doi.org/10.1070/QEL16609>
11. Hall J. L., Definition and measurement of optical frequencies: perspectives of optical clocks – and more, *Physics-Uspekhi*, 2006, vol. 176, no. 12. pp. 1353–1367. (In Russ.) <https://doi.org/10.3367/UFNr.0176.200612i.1353>
12. Hensh T. V., Passion for accuracy, *Physics-Uspekhi*, 2006, vol. 176, no. 12. pp. 1368–1380. (In Russ.) <https://doi.org/10.3367/UFNr.0176.200612j.1368>
13. Ye J., Schnatz H., Hollberg L. W., *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2003, vol. 9, no. 4, pp. 1041–1058. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2003.819109>
14. Chekirda K. V., Kosmina M. A., Leibengardt G. I., Shur V. L., Lukin A. Ya., Improvement of the state primary standard of the unit plane angle, *Measurements and tests in shipbuilding and related industries. SUDOMETRICA-2014*, Abstracts of reports, 2014, pp. 157–159. (In Russ.)
15. Chekirda K. V., Shur V. L., Kosmina M. A. Investigations of the state primary standard of the unit plane angle, *Metrology of time and space. Materials of the VIII International Symposium*, 2016, pp. 182–184. (In Russ.)
16. Zakharenko Yu. G., Kononova N. A., Fomkina Z. V., Chekirda K. V., Lukin A. Ya., The development of application software of the new equipment for realization and transmission of the length unit, *Pribory*, 2018, no. 12 (222), pp. 42–47. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 02.06.2022; одобрена после рецензирования 15.06.2022; принята к публикации 17.06.2022.
The article was submitted 02.06.2022; approved after reviewing 15.06.2022; accepted for publication 17.06.2022.