

ЧЕКИРДА КОНСТАНТИН ВЛАДИМИРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО
ПЕРВИЧНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ ДЛИНЫ**

**Специальность 05.11.01 – Приборы и методы измерения по видам измерений (механические
величины)**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Санкт-Петербург
2013**

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И. Менделеева»

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук, заслуженный метролог РФ Александров Валерий Сергеевич

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор Марусина Мария Яковлевна., заведующая кафедрой Измерительных технологий и компьютерной томографии. Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики;

Доктор технических наук, профессор Павлов Петр Алексеевич, профессор кафедры лазерных измерительных и навигационных систем. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им В. И. Ульянова (Ленина)

Ведущая организация:

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (г. Москва).

Защита состоится «18» ноября 2013 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 308.004.01 при ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

Автореферат разослан «10» октября 2013 года.

Отзывы на автореферат просим направлять по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 19.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Г.П. Телитченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Постоянный и повсеместный рост требований к точности измерений, наблюдаемый во всем мире, затрагивает и область механических измерений, в частности, геометрические измерения. В последние десятилетия стала бурно развиваться область линейных измерений, связанная с лазерами и приборами на их основе. Появились такие современные высокоточные средства измерений, как тахеометры, лазерные сканеры, высокоточные промышленные лазерные интерферометры, обладающие уникальными характеристиками, для метрологического обеспечения которых требуется расширение диапазона передачи единицы как в область «средних» длин так, и в область субмикронных длин и наноразмеров. В настоящее время в Российской Федерации эксплуатируется один военный эталон, более десяти вторичных эталонов, а эталонов 1 разряда более 10000. Кроме того, в Центрах Стандартизации и Метрологии (ЦСМ) и ведущих промышленных предприятиях эксплуатируются лазерные сканеры типа TOPKON, прецизионные лазерные интерферометры перемещений типа Renishaw, HP, Zigo, калибровка (поверка) которых требует от эталона единицы длины повышения точности и расширения диапазона измерений.

Вопросами повышения точности воспроизведения и передачи единицы длины занимались такие видные ученые, как: Чеботаев В.П., Коронкевич В.П., Витушкин Л.Ф., Захаренко Ю.Г., Федорин В.Л., Болонин А.А., Лейбенгардт Г.И., Шур В.Л. и др.

Задача совершенствования Государственного первичного эталона (ГПЭ) единицы длины с целью повышения точности воспроизведения и передачи единицы определяются требованиями различных отраслей промышленности, науки и техники.

Кроме того, для Государственного эталона единицы длины (ГЭТ 2-85), утвержденного в 1985 году, неисключенная систематическая погрешность воспроизведения составляет $1 \cdot 10^{-9}$, при СКО $2 \cdot 10^{-11}$, что не удовлетворяет требованиям к точности измерений и решаемым измерительным задачам в настоящее время. С появлением генераторов оптических гармоник (СОМВ генераторов) появилась возможность более точного определения точностных характеристик эталона единицы длины.

Цели работы.

Целью работы является совершенствование государственного эталона единицы длины, комплексный анализ источников составляющих погрешности аппаратуры воспроизведения единицы длины, исследование наиболее существенных источников погрешности с целью создания методов и измерительных установок, позволяющих повысить точность воспроизведения и передачи единицы длины. Были сформулированы следующие задачи:

- Обзор и анализ методов и средств измерений длины. Рассмотрение метрологических характеристик Государственного первичного эталона единицы длины — метра (далее ГЭТ 2-85).
- Обзор измерительных возможностей ведущих зарубежных метрологических центров в области измерений длины.
- Выбор основных направлений совершенствования государственного первичного эталона единицы длины.
- Исследование составляющих погрешности воспроизведения единицы длины и комплексный анализ погрешностей передачи единицы длины с помощью новых и усовершенствованных установок, включенных в состав эталона длины (далее ГЭТ 2-2010).
- Подтверждение на основе результатов международных сличений метрологических характеристик ГЭТ 2-2010.
- Анализ возможностей применения ядерных переходов, с целью создания сверхстабильных источников лазерного излучения и дальнейшего совершенствования ГЭТ 2-2010.

Научная новизна диссертации заключается в том, что в ней:

- исследованы физические явления, определяющие погрешность воспроизведения единицы длины государственным эталоном;
- усовершенствован и исследован государственный эталон единицы длины ГЭТ 2-2010 с улучшенными метрологическими характеристиками и функциональными возможностями;

- проведены международные сличения усовершенствованного ГЭТ 2-2010, подтверждающие его метрологические характеристики;
- разработана и утверждена новая поверочная схема для средств измерений длины ГОСТ 8.763-2011 «Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений длины в диапазоне от $1 \cdot 10^9$ до 50 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм».
- определены пути дальнейшего совершенствования ГЭТ 2-2010.

Практическая ценность работы.

Основной практической ценностью данной диссертационной работы является определение основных составляющих погрешности воспроизведения единицы длины, что позволило уменьшить суммарную погрешность воспроизведения на 2 порядка. Также определены основные пути улучшения метрологических характеристик и функциональных возможностей государственного первичного эталона единицы длины, получено экспериментальное подтверждение этого улучшения.

На основе результатов, полученных в диссертационной работе также:

- определены факторы, влияющие на погрешности воспроизведения единицы длины, и пути их компенсации;
- разработан и создан эталонный источник лазерного излучения, проведены международные сличения, усовершенствованы оптические элементы и узлы, а также аппаратно-программные средства государственного первичного эталона длины, что привело к повышению точности и стабильности воспроизведения и передачи единицы длины вторичным эталонам, эталонам 1-го разряда и современным высокоточным рабочим средствам измерений длины;

- усовершенствован и исследован эталон единицы длины, обеспечивающий расширение диапазона воспроизведения и передачи единицы длины в область малых длин до 10^{-9} и в область средних длин до 30 м;
- приведены бюджеты неопределенностей измерений при воспроизведении и передаче единицы длины;
- проведен ряд международных сличений с использованием установок из состава ГЭТ 2-2010;
- разработана методика калибровки «Лазеры частотно стабилизированные» в соответствии со стандартом Системы менеджмента качества ВНИИМ СК 02-31-09;
- разработана и утверждена новая поверочная схема для средств измерений длины ГОСТ 8.763-2011 «Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений длины в диапазоне от $1 \cdot 10^{-9}$ до 50 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм»
- определены пути дальнейшего совершенствования ГЭТ 2-2010.

Результаты работы внедрены в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

- технические решения, реализованные при совершенствовании Государственного первичного эталона единицы длины, которые обеспечили возможность уменьшения составляющих суммарных погрешностей воспроизведения и передачи единицы длины, а также позволили расширить диапазон измерений;
- результаты исследований составляющих погрешности воспроизведения и передачи единицы длины ГЭТ 2-2010;
- результаты международных сличений;

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы и отдельные её результаты докладывались и обсуждались на:

- X Международном научно-техническом семинаре «Разработка, производство, применение и метрологическое обеспечение средств измерений давления и вакуума», г. Санкт-Петербург, 2006 г.;
- научно-практической конференции, посвященной 30-летию базовой кафедры метрологии СЗТУ при ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», г. Санкт-Петербург, 2010 г.;
- научно-технической комиссии Росстандарта, г. Москва, 2010 г.;
- XLV Международной конференции по ядерной физике, г. Закопань (Польша), 2011 г.;
- Ученом совете ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»;
- семинарах лаборатории 2511 и научно-исследовательского отдела 251 ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».

Публикации, структура и объем работы. По теме диссертационной работы опубликовано 9 научных работ, в том числе 4 в журналах, рекомендованных ВАК. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 50 наименований и приложений. Общий объем работы составляет 128 страниц, включая 28 рисунков, 17 таблиц.

В диссертационной работе изложены и обобщены результаты работы, выполненной в период с 2006 по 2012 гг.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируются цели, научная и практическая значимость исследования.

Первая глава посвящена обзору методов и средств измерений длины, потребностей современной науки и техники, дано краткое описание эталона длины ГЭТ 2-85, созданного в 1985 году. Кроме того, используя опыт создания национальных эталонов единицы длины ведущих метрологических институтов мира, обоснован выбор основных составных частей государственного первичного эталона единицы длины для обеспечения

соответствия потребностям современной науки и промышленности в настоящее время и ближайшем будущем. На основании анализа потребностей отечественной промышленности и современного развития науки и техники, а также анализа зарубежного опыта по созданию национальных эталонов единицы длины были определены основные пути совершенствования эталона длины:

- разработка и совершенствование высокостабильных эталонных источников лазерного излучения в соответствии с современным уровнем и требованиями Международного Комитета по Мерам и Весам;
- модернизация метрового интерференционного компаратора в части замены изношенных, морально устаревших и не удовлетворяющих современным требованиям элементов и узлов, а также автоматизация процесса управления и измерения в соответствии с современным развитием информационных технологий и вычислительной техники;
- расширение диапазона измерений от 10^{-9} до 30 м за счет включения в состав эталона новых установок, реализующих современные достижения науки и техники и обеспечивающих высокий научно-технический уровень, сравнимый с лучшими зарубежными аналогами.

Во **второй главе** проведен анализ составляющих погрешности воспроизведения единицы длины. Рассмотрены физические принципы стабилизации частоты (длины волны в вакууме) лазерного излучения.

Эффекты, влияющие на стабильность и воспроизводимость частоты лазера, можно разделить на два класса:

- эффекты, приводящие к непостоянству центра сверхтонкой компоненты линии поглощения на шкале частот, обусловленные причинами физического характера.
- эффекты технического характера, приводящие к смещению частоты генерации стабилизированного лазера относительно центра выбранной компоненты сверхтонкой структуры.

К эффектам, принципиально ограничивающим воспроизводимость вершин (центра) линий сверхтонкой структуры йода, относятся:

- эффекты Доплера первого и второго порядков;
- пролетное уширение компонент сверхтонкой структуры;
- эффект отдачи, влияние соседних линий сверхтонкой структуры;
- кривизна волнового фронта лазерного пучка в зоне взаимодействия с парами вещества;
- асимметрия линий сверхтонкой структуры.

Все перечисленные эффекты вносят ограничения на точность воспроизведения частоты и определяют особые требования к конструкции лазеров для уменьшения их влияний.

На основе анализа факторов, влияющих на воспроизводимость и стабильность частоты лазерного излучения, были сформированы требования к конструкции элементов стабилизированного лазера для ГЭТ 2-2010:

- резонатор из материала с компенсированным или малым температурным коэффициентом линейного расширения;
- стабилизированный источник питания;
- использование малошумящих газоразрядных трубок;
- минимизация количества оптических деталей;
- использование высококачественной зеркальной оптики;
- максимально возможная изоляция лазера от механических и акустических возмущений.

Для безусловного соответствия современным требованиям по точности воспроизведения единицы длины с учетом вышеперечисленных факторов был усовершенствован He-Ne/I₂ лазер. Блок-схема данного лазера приведена на рис. 1.

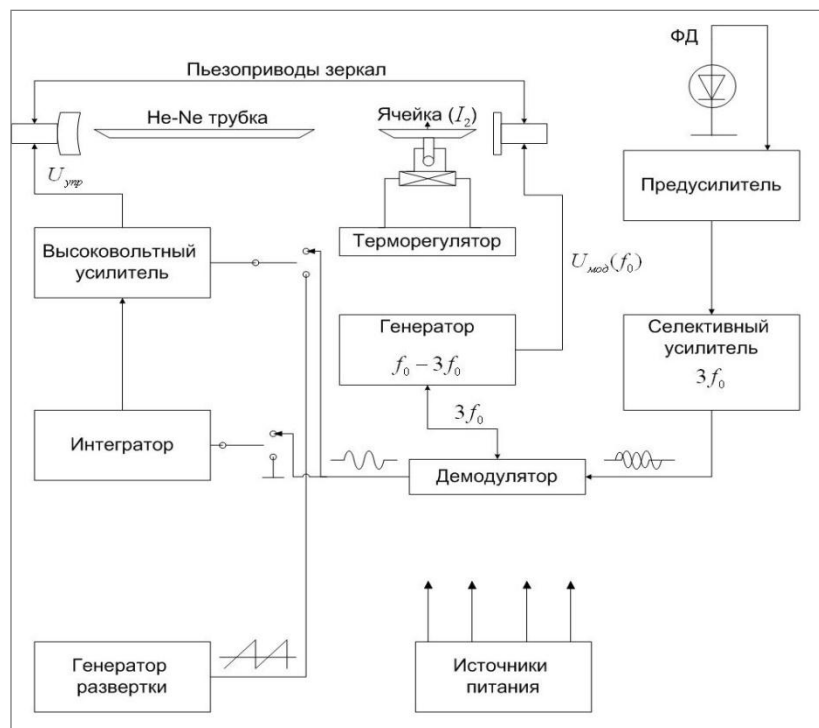


Рисунок 1. Блок-схема эталонного источника излучения — стабилизированного He-Ne/I₂ лазера из состава ГЭТ 2-2010

Основой резонатора стабилизированного He-Ne/I₂ лазера ВНИИМ являются четыре инварных стержня. Концы стержней с двух сторон соединяются с концевыми пластинами, снабженными юстировочными узлами для настройки резонатора. На юстировочных узлах закреплены пьезокерамические цилиндры с диэлектрическими зеркалами. В резонаторе применена малошумящая усилительная трубка длиной 210 мм. Длина поглощающей ячейки составляет 100 мм, отросток ячейки помещается в термохолодильнике, обеспечивающем температуру отростка $(15 \pm 0,05)^\circ\text{C}$. Резонатор размещается в алюминиевом кожухе, предохраняющем полость резонатора от потоков воздуха в помещении и частично снижающем акустические влияния.

Система автоподстройки частоты (далее АПЧ) включает в себя: малошумящий высоковольтный источник для питания усилительной трубки; блок питания системы АПЧ и терморезистора; генератор разностной частоты $f_0 - 3f_0$; фазовый детектор $3f_0$; усилитель постоянного тока; интегратор; генератор развертки; систему индикации йодных пиков.

Основные технические характеристики лазера из состава эталона приведены в таблице 1.

Таблица 1 Основные параметры стабилизированного He-Ne/I₂ лазера ВНИИМ

Наименование характеристики и единицы измерений	Значение
Выходная мощность лазерного излучения, мкВт	100
Температура отростка йодной ячейки, °С	15
Температура стенки йодной ячейки, °С	25
Длина йодной ячейки, мм	100
Длина резонатора, мм	330
Радиус зеркала R1 (со стороны He-Ne трубки), мм	1000
Радиус зеркала R2 (со стороны ячейки), мм	1500
Пропускание зеркал R1 и R2, %	1,1
Частота модуляции, кГц	10
Девиация оптической частоты, МГц	6

Были проведены исследования значений сдвигов частоты излучения лазера от рабочих параметров. Полученные значения приведены в таблице 2.

Таблица 2 Измеренные значения сдвигов частоты стабилизированного He-Ne/I₂ лазера ВНИИМ, зависящие от рабочих параметров лазера

Рабочий параметр лазера	Коэффициент чувствительности	Погрешность	Размерность
Девиация оптической частоты	-10,4	0,3	кГц/МГц
Давление паров I ₂	-9,3	0,2	кГц/Па
Выходная мощность	-0,02	0,007	кГц/мкВт
Температура стенок ячейки	0,2	0,2	кГц/°С

На основании анализа экспериментальных данных исследования стабилизированного лазера из состава ГЭТ 2-2010 с учетом влияющих

величин были определены составляющие систематической погрешности воспроизведения единицы длины эталоном.

В таблице 3 представлены составляющие систематической погрешности воспроизведения единицы длины.

Таблица 3 Составляющие систематической погрешности воспроизведения единицы длины

Составляющие погрешности	Значение погрешности, кГц	Значение погрешности относительно несущей частоты, относительные единицы
Погрешность определения давления паров йода (температуры отростка ячейки)	0,04	$8,4 \cdot 10^{-14}$
Погрешность определения частоты модуляции	0,52	$1,1 \cdot 10^{-12}$
Погрешность определения мощности излучения	0,43	$9,1 \cdot 10^{-13}$
Погрешность определения температуры стенки йодной ячейки	0,06	$1,3 \cdot 10^{-13}$
Нестабильность (расстройка) частоты из-за несовершенства системы АПЧ	0,30	$6,3 \cdot 10^{-13}$
Суммарная погрешность при $K=1,4$	1,04	$2,2 \cdot 10^{-12}$

Третья глава содержит результаты исследований и внедрения новых установок для передачи единицы длины в диапазоне от 10^{-9} до 30 м.

В состав эталона единицы длины нового поколения ГЭТ 2-2010 вошли следующие установки:

- источник эталонного излучения – He-Ne/I₂ лазер, стабилизированный по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде-127, № 02;
- установки для измерений разности частот и длин волн источников лазерного излучения, № 02У;

- компаратор лазерный интерференционный для измерения длины в субмикронном и нанодиапазоне, №01-2010;
- интерферометр гетеродинный, № 02-2009;
- компаратор универсальный интерференционный метровый, № 01-2009;
- компаратор лазерный интерференционный тридцатиметровый, № 01-2008.

На рис. 2 представлена общая схема ГЭТ 2-2010.

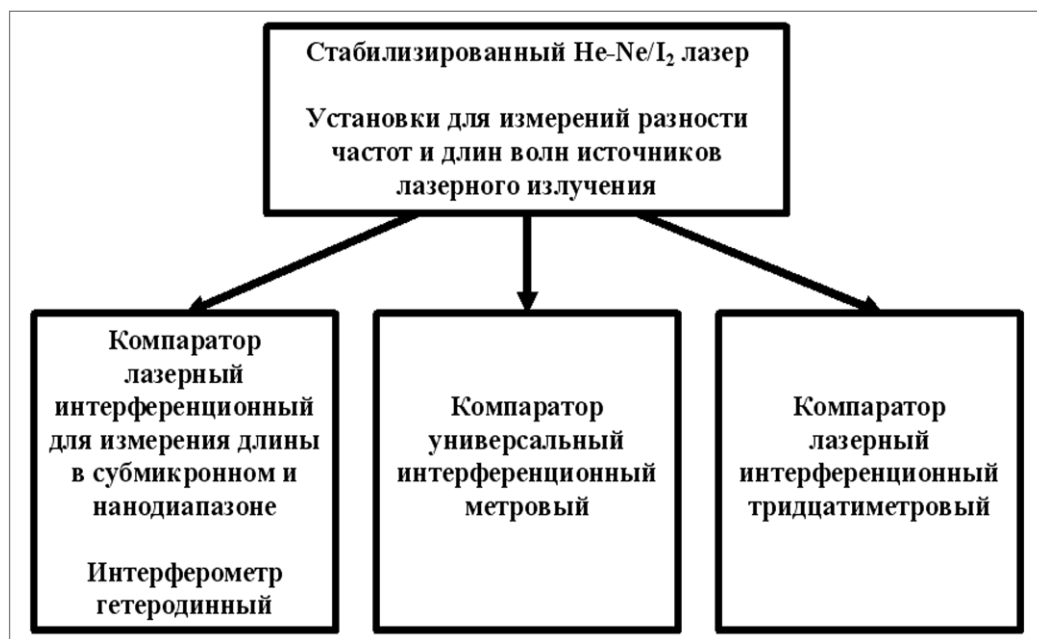


Рисунок 2. Общая схема Государственного первичного эталона единицы длины – метра ГЭТ 2-2010

В составе ГЭТ 2-2010, кроме источника эталонного излучения – стабилизированного He-Ne/I₂ лазера, применяются установки на основе лазерных интерферометров перемещений (за исключением гетеродинного интерферометра). Все установки из состава ГЭТ 2-2010 построены по двухлучевой схеме (интерферометр Майкельсона). Определение погрешности измерений интерферометров и предъявляемые к конструкции технические требования имеют много общего для каждой из установок.

Случайная погрешность интерферометра определяется следующими факторами:

- флуктуации интенсивности и частоты источника излучения $\sigma_n(I)$, $\sigma_n(\nu)$;

- шумы фотоприемника $\sigma_n(a)$;
- флуктуации от турбулентной воздушной среды и вибраций $\sigma_n(A, \Phi)$;
- дрейф коэффициента передачи оптико-электронной схемы системы регистрации $\sigma_n(p)$;
- флуктуации параметров модуляции $\sigma_n(I)$;
- изменения уровня сигнала вследствие угловой расходимости и флуктуаций оси диаграммы направленности пучка лазера $\sigma_n(\beta)$.

Основные источники систематической погрешности:

- погрешность значения (воспроизведения и измерения) длины волны лазера в вакууме $\sigma_s(\lambda)$;
- определения абсолютного значения показателя преломления воздуха $\sigma_s(n)$;
- нелинейность системы регистрации $\sigma_s(p)$;
- дефекты и aberrации оптических элементов интерферометра $\sigma_s(h)$;
- искривление волнового фронта и дифракция гауссова пучка на ограничивающих диафрагмах $\sigma_s(\Phi)$.

Обобщенные результаты исследований приведены в таблице 4.

Таблица 4 Обобщенные результаты исследований

	Диапазон	Значение погрешности
Неисключенная систематическая погрешность воспроизведения единицы длины	0,633 мкм	$2,2 \cdot 10^{-12}$
Случайная составляющая погрешности воспроизведения единицы длины	0,633 мкм	$5,6 \cdot 10^{-12}$ при 100 независимых измерениях
Стандартная неопределенность по типу А	0,633 мкм	$5,6 \cdot 10^{-12}$ при 100 независимых измерениях
по типу В		$1,5 \cdot 10^{-12}$
суммарная неопределенность расширенная		$5,8 \cdot 10^{-12}$
неопределенность		$1,16 \cdot 10^{-11}$

СКО передачи единицы длины концевым мерам (КМ) и штриховым мерам (ШМ) компаратором универсальным метровым	(0 – 1) м	0,03 мкм
СКО передачи единицы длины компаратором в субмикронном и нанодиапазоне	(10 ⁻⁹ – 10 ⁻⁴) м	0,1 нм
СКО передачи единицы длины компаратором тридцатиметровым	(1 – 30) м	5 мкм

В четвертой главе описываются результаты международных сличений ГЭТ 2-2010, подтверждающие установленные для эталона метрологические характеристики, а также пути дальнейшего совершенствования эталона для обеспечения прогнозируемых требований к эталону со стороны науки и промышленности.

Стабилизированный лазер из состава эталона единицы длины принял участие в ряде ключевых сличений, проводимых под руководством ССЛ (консультативный комитет по длине), наиболее важными из которых следует считать сличения частот стабилизированных лазеров ВРМ.L-K11. Особенностью данных сличений является то, что проводились абсолютные измерения частот лазеров относительно Цезиевого стандарта частоты при помощи СOMB-генератора.

Измерения и определение воспроизводимости и стабильности частоты лазера ВНИИМ проводились в лаборатории длины МБМВ в течении нескольких дней. Перед измерениями автором работы совместно с ведущими научными сотрудниками ВНИИМ были определены составляющие неопределенности воспроизведения частоты излучения лазера из состава ГЭТ 2-2010. Результатами измерений стали: абсолютное значение частоты лазерного излучения лазера ВНИИМ стабилизированного по пику f линии R(127) йода и значения стабильности частоты при различных временах усреднения.

Абсолютное значение частоты пика f лазера ВНИИМ из состава ГЭТ 2-2010 составило:

$$\nu(f) = 473\,612\,353\,603,6 \text{ кГц},$$

со стандартной неопределенностью 0,8 кГц.

Стабильность частоты излучения лазера была оценена среднеквадратичной вариацией (вариация Аллана), определяемой соотношением:

$$\sqrt{\langle \sigma^2(2\tau) \rangle} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(\nu_{2i} - \nu_{2i-1})^2}{2}},$$

где ν_{2i} , ν_{2i-1} – значения частоты биений двух независимо стабилизированных лазеров в последовательно равные интервалы времени;

τ – время усреднения счетчика;

N – число пар выборок.

Для лазера ВНИИМ значения стабильности частоты излучения составили:

для $\tau=1$ с 2,6 кГц,

для $\tau=10$ с 0,7 кГц.

В таблице 5 и на рисунке 4 приведены результаты измерения стабильности частоты лазера ВНИИМ.

Таблица 5. Результаты измерения стабильности частоты лазера ВНИИМ

τ (s)	Rel. Allan dev.	Rel. uncert.	Allan dev. (Hz)	Uncert. (Hz)
1.1	5.66E-12	3.25E-13	2679.4	153.9
2.1	4.75E-12	3.86E-13	2248.5	183.0
5.3	3.24E-12	4.22E-13	1534.6	199.8
10.7	1.73E-12	3.21E-13	818.6	152.0
21.3	1.11E-12	2.97E-13	526.1	140.6
53.3	4.10E-13	1.83E-13	194.0	86.8
106.5	3.66E-13	2.59E-13	173.2	122.4

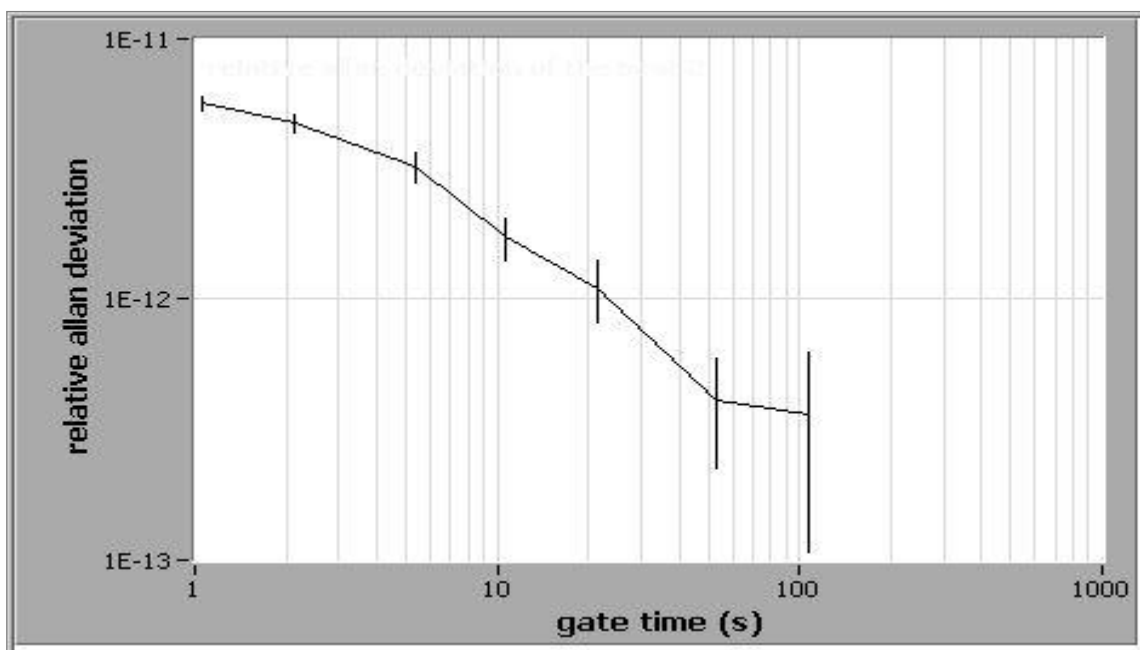


Рисунок 3. График вариации Аллана от времени усреднения

На рисунке 4 приведены результаты сличений лазеров относительно стандарта частоты МБМВ.

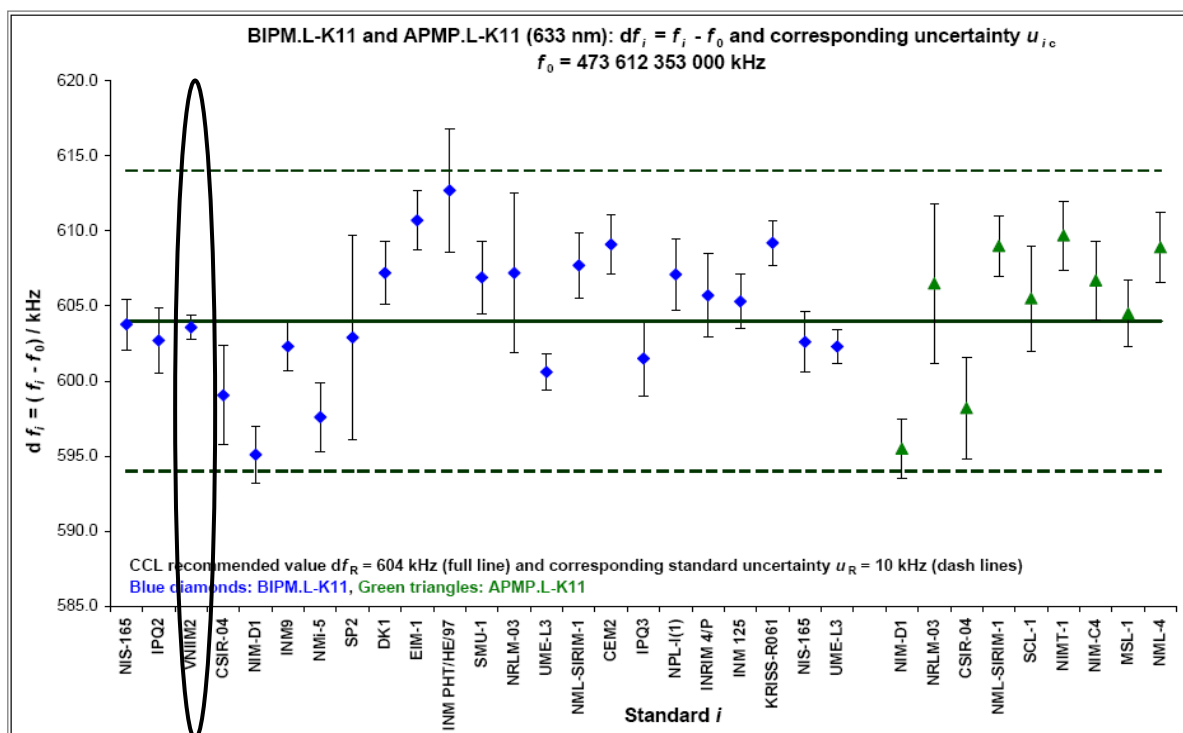


Рисунок 4. Результаты сличений лазеров относительно стандарта частоты МБМВ

Результаты сличений стабилизированного лазера из состава ГЭТ 2-2010 свидетельствуют о полном его соответствии требованиям Международного

Комитета по Мерам и Весам по точности воспроизведения единицы длины - метр, а также о высоком научно-техническом уровне примененных решений при разработке и исследовании лазера из состава эталона. Установки для передачи единицы длины также принимали участие в ключевых сличениях, проводимых как под эгидой МБМВ, так и под эгидой региональных метрологических организаций.

Наиболее значимыми можно считать сличения, проведенные в рамках EUROMET.L-K7 и COOMET L.S-1 Project № 277/UA/03.

На рисунке 5 представлены результаты сличений в рамках EUROMET.L-K7. Мерой сравнения в сличениях являлась специальная штриховая мера, изготовленная компанией HEIDENHAIN (DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH, Германия).

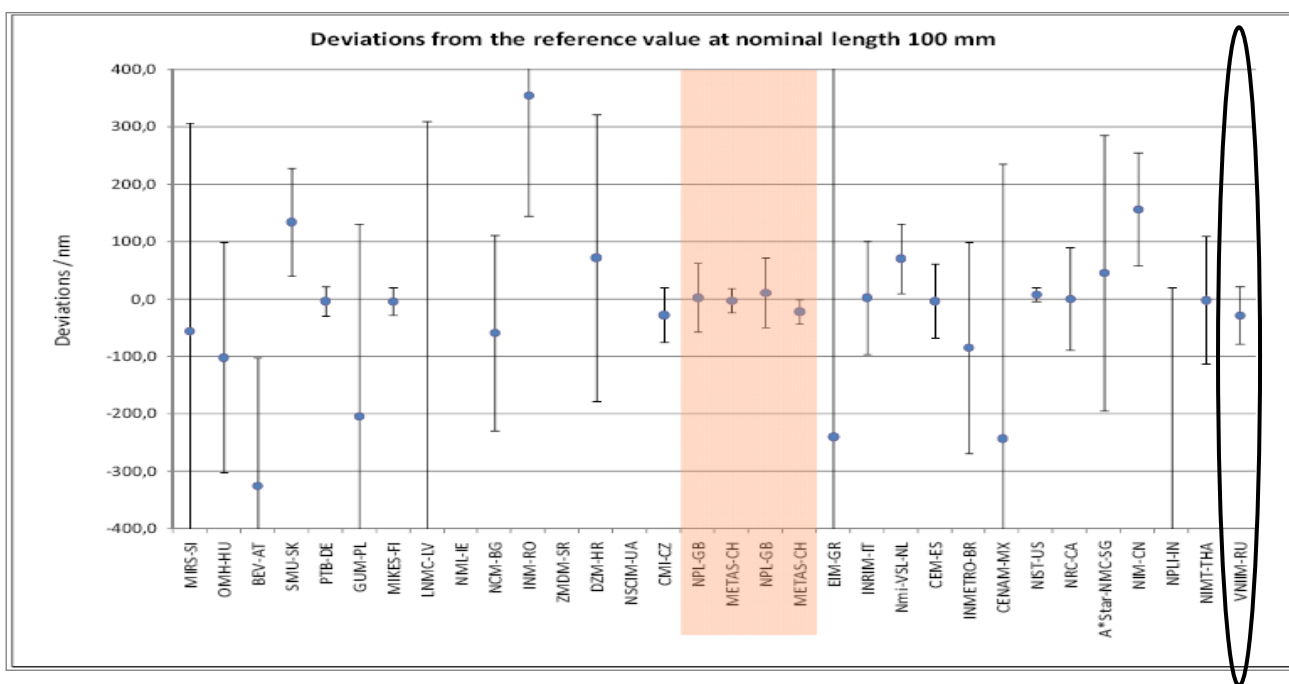


Рисунок 5. Результаты сличений в рамках EUROMET.L-K7

На рисунке 6 представлены результаты сличений в рамках COOMET L.S-1 Project № 277/UA/03. Мерой сравнения в сличениях являлась штриховая мера, изготовленная из инвара.

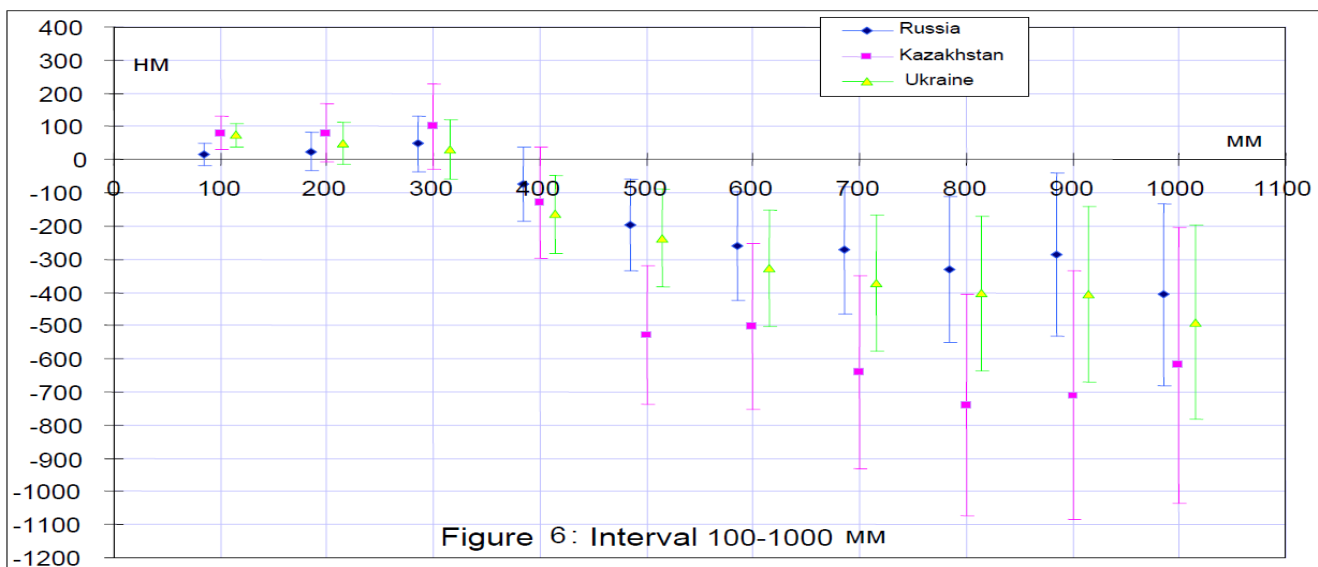


Рисунок 6. Результаты сличений в рамках COOMET L.S-1 Project № 277/UA/03

В этой же главе рассмотрен вопрос о перспективных направлениях совершенствования эталона единицы длины. Единица длины связана с единицей частоты через скорость света, которая является константой в вакууме. Поэтому определения этих единиц взаимосвязаны, с повышением точности воспроизведения частоты должна увеличиваться точность и для длины. Для этого необходимо, чтобы электромагнитные колебания, длина волны которых используется для воспроизведения длины, имели высокую стабильность частоты и эта частота была измерена относительно эталона частоты. В настоящее время для измерений длины широко используются лазерные интерферометры. Для лазерной интерферометрии служат стабилизированные лазеры, частота которых измеряется на эталоне частоты с использованием COMB - генератора, который позволяет связать частоты радиодиапазона (эталон частоты работает сегодня в этом диапазоне) с оптическими частотами стабилизированных лазеров. В настоящее время та точность, которую имеют эталоны, уже недостаточна для решения ряда фундаментальных физических задач и прикладных научно-технических задач

тоже. К таким задачам можно отнести измерение очень малых перемещений, регистрацию гравитационных смещений и гравитационных волн. Кроме того, следует сказать о проверке общей теории относительности, уточнении физических констант, а современные теории, которые пытаются объединить гравитацию с другими фундаментальными силами, могут приводить к выводам о пространственных и временных вариациях фундаментальных констант. Имеется в виду постоянная тонкой структуры и отношение масс протона/электрона. Следует отметить, что все эталоны частоты, в том числе и оптические лазеры, используют в качестве реперов атомные и молекулярные переходы. Частота излучения (поглощения) для этих переходов сильно зависит от температуры, зависит от примесей, плотности вещества поглотителя и многих других факторов, поэтому не приходится ожидать значительного повышения точности воспроизведения указанных эталонов. Совершенно иные перспективы открывают ядерные изомерные переходы, так как любые влияния на ядра как минимум на пять порядков меньше. В последние годы обнаружены переходы в ядрах с оптической частотой, которые могут быть использованы для создания эталонов на уровне двадцатых знаков по точности и воспроизводимости. Очевидно, что этот резерв в ближайшие годы будет исследован и использован в метрологии. В нобелевской лекции Дж. Холла высказано предположение о возможности продления диапазона работы СOMB-генератора до десятков килоэлектронвольт, это предположение, при его реализации, может открывать широкие перспективы при изучении частот переходов низкоэнергетических уровней, а также стабилизации частоты лазеров по этим реперам.

Для работы по исследованию возможностей создания реперов частоты с использованием ядерных изомерных переходов необходимо приобрести СOMB-генератор, создать и исследовать перестраиваемые в широком частотном диапазоне стабилизированные лазеры. СOMB-генератор и перестраиваемые лазеры позволят обеспечить проведение фундаментальных

исследований физических констант, а также создать сверхточные интерферометры для измерения длин, избавившись от перемещающихся измерительных плеч за счет широкой перестройки по частоте (длине волны в вакууме) лазеров.

Основные результаты

По итогам комплекса теоретических и экспериментальных исследований на аппаратуре Государственного первичного эталона единицы длины были получены следующие основные результаты:

- проведен анализ потребностей науки и промышленности в метрологическом обеспечении высокоточных средств измерения длины. На основании проведенного анализа и обзора состава эталонов длины ведущих национальных метрологических институтов мира обоснован состав Государственного первичного эталона единицы длины ГЭТ 2-2010,

- проведен анализ составляющих погрешности воспроизведения единицы длины Государственного первичного эталона ГЭТ 2-2010. Рассмотрены физические принципы стабилизации частоты (длины волны в вакууме) лазерного излучения. На основе анализа факторов, влияющих на воспроизводимость и стабильность частоты лазерного излучения были сформированы требования к конструкции элементов стабилизированного лазера для ГЭТ 2-2010. Доработан, исследован и включен в состав эталона ГЭТ 2-2010 источник эталонного излучения — He-Ne/I₂ лазер, стабилизированный по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде -127, №2,

- исследованы и включены в состав эталона интерференционные компараторы: компаратор лазерный интерференционный для измерения длины в субмикронном и нанодиапазоне, № 01-2010, интерферометр гетеродинный, № 02-2009, компаратор универсальный интерференционный метровый, № 01-2009, кроме того включен в состав компаратор лазерный интерференционный тридцатиметровый, № 01-2008. Данные компараторы

позволили существенно расширить диапазон передачи размера единицы длины Государственным первичным эталоном единицы длины.

Разработанные измерительные установки и полученные результаты исследований позволили повысить в два раза точность воспроизведения и передачи единицы длины Государственным первичным эталоном ГЭТ 2-2010.

Решение поставленной в работе задачи по улучшению метрологических характеристик Государственного первичного эталона единицы длины имеет существенное значение для повышения прецизионности измерения длин в науке и промышленности.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

- Захаренко Ю.Г., Кононова Н.А., Федорин В.Л., Чекирда К.В. Эталонный He-Ne/I₂ лазер для ГПЭ единицы длины – метра // Тез. докл. X Международного научно-технического семинара «Разработка, производство, применение и метрологическое обеспечение средств измерений давления и вакуума». – СПб. // Репрография ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». – 2006. – С. 41-43.
- Захаренко Ю.Г., Кононова Н.А., Мельников Н.А., Федорин В.Л., Чекирда К.В. Современное состояние воспроизведения единицы длины метра // Приборы. – 2007. – № 8 (86). – С. 53-55.
- Александров В.С., Захаренко Ю.Г., Кононова Н.А., Мельников Н.А., Пастернак А.А., Федорин В.Л., Харитонов И.А., Чекирда К.В. О возможности использования низкоэнергетических ядерных переходов в качестве реперов для стабилизации частоты лазеров // Измерительная техника. – 2007. – №12. – С. 3-8.
- Aleksandrov V.S., Zakharenko Yu.G., Kononova N.A., Mel'nikov N.A., Fedorin V.L., Kharitonov I.A., Chekirda K.V., Pasternak A.A. Possibility of using low-energy nuclear transitions as benchmarks for frequency

- stabilization // Measurement Techniques. – 2007. – V.50. – № 12. – P. 1231-1233.
- Захаренко Ю.Г., Кононова Н.А., Федорин В.Л., Чекирда К.В. Высокоточные измерения геометрических величин на Государственном первичном эталоне единицы длины // Тез. докл. Всероссийской научно-технической конференции «Механометрика-2008». – г. Суздаль. – 2008. – С. 40-41.
 - Александров В.С., Захаренко Ю.Г., Кононова Н.А., Мельников Н.А., Пастернак А.А., Федорин В.Л., Чекирда К.В. Использование ядерных переходов в качестве эталонов, в том числе для стабилизации частоты лазеров // «Актуальные вопросы метрологии», сборник материалов научно-практической конференции, посвященной 30-летию базовой кафедры метрологии СЗТУ при ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». – СПб. – 2010. – С. 16-22.
 - Александров В.С., Захаренко Ю.Г., Кононова Н.А., Федорин В.Л., Чекирда К.В. Стабилизированный лазер Государственного эталона длины - метра // «Актуальные вопросы метрологии», сборник материалов научно-практической конференции, посвященной 30-летию базовой кафедры метрологии СЗТУ при ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». – СПб. – 2010. – С. 23-27.
 - Aleksandrov V.S., Chekirda K.V., Fedorin V.L., Melnikov N.A., Pasternak A.A., Zakharenko Yu.G. Nuclear transitions and new standards of length and time // XLV Zakopane conference on nuclear physics. Extremes of the nuclear landscape // Acta Physica Polonica, Series B. – 2011. – V.42. – № 3-4. – P. 853-858.
 - 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.