

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПЕРЕДАЧИ РАЗМЕРА ЕДИНИЦЫ ДЛИНЫ ПУТЕМ СЛИЧЕНИЯ ЛАЗЕРОВ

Ю.П.Мачехин

Обсуждаются порядок проведения сличений He-Ne¹²⁷I₂ лазеров и порядок проведения калибровки рабочих эталонов стабилизированных по частоте лазеров. Впервые представлена полная методика расчета сдвигов частоты лазеров с учетом влияния всего комплекса параметров лазера.

ВВЕДЕНИЕ

В Резолюции 4 XX Генеральной конференции по мерам и весам [1] было зафиксировано, что требования науки и техники связаны с повышением точности в реализации метра и, соответственно, с повышением воспроизводимости оптической частоты (длины волны) излучения, используемых в практической реализации метра.

На практике повышение воспроизводимости оптической частоты излучения требует серьезных физических исследований и создания новых типов стабилизированных по частоте лазеров и является в большей мере задачей стратегической, определяющей дальнейшее развитие эталонов в области измерения длины. Тактической задачей в настоящее время является реализация определения метра на основе тех лазеров, которые уже рекомендованы Международным Комитетом по мерам и весам (МКМВ). Большинство стран, входящих в состав Метрологической организации стран Западной Европы (ЕВРОМЕТ), уже реализовали эту задачу не только на уровне национальных эталонов, но и на уровне практической метрологии, используя лазеры для передачи размера единицы длины как вторичным, так и рабочим эталонам. Кроме того, широкое применение лазерных измерительных интерферометров в производстве и в технологических процессах позволяет использовать размер единицы длины, который непосредственно передается от стабилизированных по частоте лазеров.

В настоящее время в Украине на уровне государственного эталона реализовано новое определение метра, однако рабочие эталоны – стабилизированные по частоте лазеры – в настоящее время в территориальных органах Госстандарта практически не используются. За исключением Днепропетровского и Харьковского ЦСМС, заявок на проведение поверок стабилизированных по частоте лазеров от территориальных органов не поступает. В первую очередь, это говорит не об отсутствии должного

финансирования в ЦСМС, а об отсутствии в этих центрах технической политики, направленной на реализацию передачи размера единицы длины от стабилизированных по частоте лазеров всем остальным средствам измерения длины. При этом не следует считать, что настало время полного отказа от материальных мер (как концевых, так и штриховых) и что будет разрешено в ближайшее время только использование лазеров. Вопрос ставится шире: если мы принимаем новое определение метра и реализуем его в Украине, то должны ли мы развивать всю метрологическую базу измерения длин с учетом той новой технической и научной идеологии, которая лежит в основе нового определения метра, или нам достаточно с помощью лазеров только лишь решить вопрос воспроизведения и хранения единицы длины на уровне государственного эталона, а остальную часть, связанную с вторичными и рабочими эталонами, оставить без изменения. Вопрос этот не является предметом данной статьи, но он принципиальный и должен быть решен в достаточно обозримом будущем, поскольку существующая неопределенность в его решении отрицательно скажется на темпах развития данного вида измерений в самом ближайшем будущем. Опираясь на основополагающую роль лазеров в реализации метра, необходимо развивать все аспекты использования лазеров. Поэтому предметом настоящей статьи стала систематизация методов сличений и поверок лазеров с целью формулирования основных методических условий для ознакомления специалистов со средствами измерений, которые могут найти применение в территориальных органах и калибровочных лабораториях. Один из путей для совершенствования системы метрологического обеспечения в области измерения длин – последовательное и планомерное разъяснение основных принципов работы по передаче размера единицы от лазерных источников к материальным мерам и передаче размера единицы длины между лазерными источниками. Практически полное отсутствие в отечественной литературе по метрологии информации о лазерах как средствах измерения длины и о методах передачи размера единицы от них к материальным мерам поставило целью данной статьи подготовку краткого обзора методов выполнения работ, связанных

не с созданием, а уже с использованием стабилизированных по частоте лазеров в метрологических целях.

МЕТОДИКА СЛИЧЕНИЙ ЛАЗЕРОВ ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭТАЛОНА ДЛИНЫ

В отличие от метрологических центров стран ЕВРОМЕТ, в которых в качестве национальных эталонов длины признаны He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ лазеры со стабилизацией частоты излучения, в Украине государственный эталон единицы длины включает как сами лазеры, так и компаратор совместно со штриховой и концевой мерами. Такой состав государственного эталона позволяет осуществлять воспроизведение, хранение и передачу размера единицы длины, как источникам излучения, так и материальным мерам. В настоящей статье будет рассмотрен вопрос только о передаче размера единицы длины лазерным источникам, считая, как было отмечено выше, что это вопрос наименее освещенный в отечественной метрологической литературе, хотя результаты международных сличений лазеров публиковались неоднократно.

He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ лазеры, включенные в состав государственного эталона, имеют конструктивные и технические особенности, позволяющие осуществлять стабилизацию оптической частоты в 14 реперных частотных точках, которые заданы линиями сверхтонкой структуры спектра поглощения насыщенных паров молекулярного йода $^{127}\text{I}_2$ (изотоп 127). В дальнейшем будут обсуждаться только частота и частотные характеристики лазеров, поскольку длина волны излучения в вакууме определяется по универсальному соотношению $\lambda = c/\omega$, где c – скорость света в вакууме, а ω – частота оптического излучения. Это принципиальный момент в определении размера единицы длины, когда длина волны вычисляется по измеренному значению частоты оптического излучения. Поэтому считаем, что рассматриваемые лазеры позволяют воспроизвести 14 значений длин волн. В приложениях и рекомендациях по практической реализации определения метра Международного комитета по мерам и весам [2] представлен перечень источников излучения, для которых даны установленные абсолютные значения частот и соответствующие им длины волн. При этом приведены условия, при которых можно воспроизвести эти значения частот. Так, для He-Ne лазера со стабилизацией частоты (на длине волны $\lambda \approx 633$ нм) по пикам насыщенного поглощения в $^{127}\text{I}_2$, совпадающим с линиями сверхтонкой структуры, на линии 11-5(R127) дано абсолютное значение частоты излучения лазера, соответствующее стабилизации по пику "i", и оно равно $\omega = 473612214,705$ МГц. Кроме этого, протабулированы частотные расстояния между всеми пиками, регистрируемыми на этой линии (всего на этой линии 20 пиков от "a" до "t"), и пиком "i". При этом, в международных реализациях оговорены такие условия, как внутрирезонаторная мощность излу-

чения лазера, температура, при которой находится кристаллический йод в ячейке, давление насыщенного пара йода в ячейке и амплитуда девиации оптической частоты, задаваемой поисковой модуляцией.

Сличения лазеров, как правило, предполагают выявление отклонения (сдвига) реальной частоты от номинальной, зарегистрированной в официальных документах. Именно методика определения сдвига частоты путем сравнения (сличения) частот двух лазеров, один из которых имеет заведомо известную частоту, является предметом международных сличений. В "Украинском метрологическом журнале" публиковались результаты международных сличений He-Ne/ I_2 лазеров, в которых участвовали лазеры государственного эталона единицы длины [3-5]. Однако в этих статьях не описывалось, как получаемые данные обрабатывались и как необходимо интерпретировать полученные результаты.

Методика сличений He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ лазеров с $\lambda=633$ нм, стабилизированных по пикам поглощения в изотопе йода $^{127}\text{I}_2$ на линии 11-S(R127), была разработана в Международном бюро мер и весов (МБМВ) и распространялась через те сличения, которые проводились под эгидой этой организации. По мере того, как совершенствовались конструкции лазеров, участвовавших в международных сличениях, и улучшались их характеристики, совершенствовалась и методика их сличений. Сформированный в настоящее время объем измерений, проводимых в процессе сличений, позволяет определить как сдвиг частоты излучения, так и ее нестабильность.

Конструктивные особенности лазеров МБМВ повлияли на объем проводимых измерений. Так, эти лазеры используются только при стабилизации по пикам группы d,e,f,g, поскольку в области группы h,i,j и дальше наблюдается появление поперечной моды, из-за которой невозможно осуществлять стабилизацию частоты лазеров, а также проводить корректные измерения. Поэтому сличения проводятся в условиях, когда каждый из двух лазеров последовательно стабилизируется по одному из пиков группы d,e,f,g. Следует отметить, что между лазерами, которые работают в одномодовом режиме при стабилизации по пикам h,i,j (примером тому являются лазеры государственного эталона Украины), сличения могут проводиться и по группе h,i,j.

Процедура сличений осуществляется с использованием гетеродинной установки, которая позволяет измерять разность между двумя близкими оптическими частотами. Частотное расстояние между пиками составляет десятки и сотни мегагерц, соответственно разности между частотами лазеров, которые застabilизированы по этим пикам, будут уже не в оптическом, а в радиодиапазоне, и их измерение можно осуществлять с помощью обычных частотомеров. Так, разность между пиками группы d,e,f,g составляет в среднем от 12 до 13 МГц, а такое значение разностной частоты можно измерить с точностью до сотен герц.

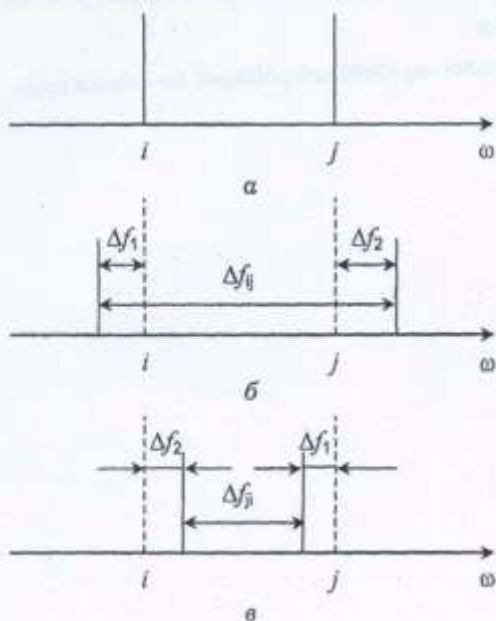
Измерения в пределах указанной группы осуществляются следующим образом.

Каждый из двух лазеров последовательно стабилизируется по одному из пиков группы d, e, f, g, измеренная разность оптических частот заносится в таблицу [3-5].

Таблица

Лазер 1 \ Лазер 2	d	e	f	g
d		Δf_{ed}	Δf_{fd}	Δf_{gd}
e	Δf_{de}		Δf_{fe}	Δf_{ge}
f	Δf_{df}	Δf_{ef}		Δf_{gf}
g	Δf_{dg}	Δf_{eg}	Δf_{fg}	

Принципиальным моментом является то, что $\Delta f_{ij} \neq \Delta f_{ji}$. Если бы лазеры не имели сдвигов относительно номинальных значений, то $\Delta f_{ij} = \Delta f_{ji}$ и тогда $\Delta f = 0$. Однако на практике встречается обратная ситуация, когда частоты лазеров имеют сдвиги по отношению к номинальным значениям и описываемая методика позволяет определить, насколько частота одного лазера сдвинута относительно частоты другого. Это связано с тем, что при стабилизации частоты лазеров по любому из пиков поглощения реальная частота излучения лазера оказывается сдвинутой по отношению к номинальному значению, которое приписано каждому пику. Выявление сдвигов можно объяснить, ориентируясь на диаграммы расположения пиков и частот лазеров на оси частот, представленные на рисунке, где a – номинальное расположение частот пиков i и j на частотной оси, по которым осуществляется стабилизация частоты лазеров; разность частот определяется как $f_i - f_j$; b – расположение частот двух лазеров и разность между ними, когда лазер 1 стабилизирован по пику i (его частота $f_i - \Delta f_1$), а лазер 2 – по пику j (его частота $f_j + \Delta f_2$); разность частот между лазером 2 и лазером 1 в этом случае



определяется как $f_i - f_j + \Delta f_1 + \Delta f_2$; a – расположение частот лазеров, когда лазер 1 стабилизирован по пику j (его частота $f_j - \Delta f_1$), а лазер 2 – по пику i (его частота $f_i + \Delta f_2$); разность частот между лазером 2 и лазером 1 в этом случае определяется как $f_i - f_j - \Delta f_1 - \Delta f_2$.

Сдвиг разности частот лазеров, которые стабилизированы по пикам i и j , по отношению к номинальному значению определяется как $(\Delta f_{ij} - \Delta f_{ji})/2 = \Delta f_{ij}$. Среднее значение сдвига разностной частоты лазеров определяется по всей группе, то есть по всем недиагональным элементам приведенной таблицы, и равно $\Delta f = 1/6 \sum_{i,j} \Delta f_{ij}$. Окончательный расчет сдвига частоты между сравниваемыми лазерами осуществляется путем коррекции в соответствии с рекомендуемыми величинами параметров лазеров. К таким параметрам относятся внутривибрационная мощность лазера, температура йода в ячейке и девиация оптической частоты. Величины этих параметров зафиксированы в рекомендациях [2], по отношению к которым и осуществляется пересчет сдвига частоты. При этом предполагается, что в процессе отдельной группы измерений (они могут быть выполнены как до сличений, так и в процессе их проведения) выявляются коэффициенты мощностного сдвига k_p , модуляционного сдвига k_m и коэффициент температурного сдвига k_T для каждого из двух сравниваемых лазеров. С помощью этих коэффициентов определяется величина соответствующего сдвига при условии, что параметр имеет величину, отличную от номинального значения. В итоге общий вид выражения для определения сдвига частоты между двумя лазерами при условии привязки к номинальным значениям параметров имеет следующий вид:

$$\Delta F = \Delta f + k_{p1}(P_1 - P_{ном}) + k_{m1}(U_1 - U_{ном}) + k_{T1}(T_1 - T_{ном}) - [k_{p2}(P_2 - P_{ном}) + k_{m2}(U_2 - U_{ном}) + k_{T2}(T_2 - T_{ном})],$$

где $P_{ном}$ – номинальная внутривибрационная мощность, 10 мВт; $U_{ном}$ – номинальная девиация, 6 МГц; $T_{ном}$ – номинальная температура йода, 15 °C. В экспериментах может использоваться не внутривибрационная мощность, а выходная (в этом случае коэффициент k_p пересчитывают). Использование метода коррекции позволяет единообразно выражать сдвиги частот между лазерами, участвующими в разных сличениях.

Для иллюстрации использования методики сличений He-Ne/I₂ лазеров приведем результаты международных сличений, в которых участвовали лазеры государственного эталона единицы длины Украины. В 1994 г. лазер KIM2 участвовал в международных сличениях в Братиславе, и был определен сдвиг этого лазера относительно лазера ВРМ4, который составил 8,2 кГц. В 1999 г. сличения с лазером РТВ-03/86 дали для лазера ДЕ2 сдвиг +13,4 кГц. Однако проведенные несколько позже сличения РТВ-03/86 с лазером ВРМ4 дали для него сдвиг -9,5 кГц. Та-

ким образом, лазер ДЕ2 по отношению к ВІРМ4 оказался сдвинутым на +3,9 кГц. В результате, путем парных сличений нам удалось установить величину сдвига лазера ДЕ2 по отношению к ВІРМ4. И самое главное, что величина этого сдвига с 1994 г. уменьшилась.

ПОВЕРКА ВТОРИЧНЫХ И РАБОЧИХ ЭТАЛОНОВ

В качестве вторичных и рабочих эталонов используются, как правило, He-Ne лазеры с $\lambda \approx 633$ нм, частота которых стабилизируется по контуру усиления. Наиболее широко в настоящее время применяются двухчастотные лазеры, в которых используется эффект Зеемана для расщепления линии излучения и стабилизации ее частоты.

Порядок поверки таких лазеров предусматривает определение абсолютной частоты (длины волны в вакууме) излучения путем сравнения их частоты с частотой He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ лазеров. Таким образом, при проведении аттестационных и поверочных работ стабилизируемым лазером, используемым в качестве рабочих эталонов или рабочих средств измерений, передается размер частоты (длины) в абсолютных единицах сдвига частоты.

Методика поверки основана на описанном выше гетеродинном методе. Опорный лазер, в качестве которого используется He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ лазер, имеет частоту ω_1 , поверяемый – частоту ω_2 . Регистрируемая разностная частота $\Delta\omega_{12} = |\omega_1 - \omega_2|$ показывает только разность частот, но не позволяет указать, какая из них больше. Для этого необходимо дополнительно провести еще одни измерения, когда частота опорного лазера может быть изменена на известную величину. Использование He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ лазера позволяет это осуществить путем перестройки стабилизации частоты с одного пика на другой. В этом случае будет измерена разность частот между опорным ω_3 и поверяемым ω_2 лазерами: $\Delta\omega_{32} = |\omega_3 - \omega_2|$. Величина этой разности частот, известная разность

между ω_1 и ω_3 позволяют однозначно определять положение частоты ω_2 . Дальнейшая процедура поверки сводится к тому, что к известной абсолютной частоте ω_1 добавляется или вычитается, в зависимости от определенного местоположения, частота $\Delta\omega_{12}$.

На этом принципе двух гетеродинных измерений и построена методика аттестации и поверки лазерных источников по длине волны излучения. Но для этого, как видно из вышеприведенных условий, необходим лазер, у которого есть возможность стабилизировать частоту как минимум в двух разных точках зоны генерации. Такому условию удовлетворяет He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ лазер, который был рассмотрен выше.

Описанная методика гетеродинного сличения частот лазеров позволяет достаточно просто осуществлять аттестацию и поверку стабилизированных по частоте He-Ne лазеров, используемых в измерительных лазерных интерферометрах.

Список литературы

1. Resolutions adopted by the 20th Conference Generale des Poids et Mesures. 9-12 October 1995. -Paris: Imprimerie GAUTHIER-VILLARS, 1995.
2. Queen T.J. // Metrologia. -1994. -Vol. 30, № 5. -P. 523-541.
3. Мачехин Ю.П., Смулаковский В.М., Одинец В.А. и др. //Измерительная техника. -1997. -№ 11. -С.71-72.
4. Смулаковский В.М., Навратіл В. //Український метрологічний журнал. -1998. -Вип. 4. -С. 51-52.
5. Демидова А.Е., Макаревич В.Б., Стрелъ У., Мачехин Ю.П. и др. //Там само. -2000. -Вип. 1. -С. 26-28.

THE MAIN PRINCIPLES OF TRANSFER OF THE UNIT OF LENGTH SIZE BY LASERS COMPARISONS

Y.P.Machehkhin

The order of conducting comparisons of He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ lasers and the order of conducting calibration of working standards of frequency-stabilized lasers are discussed. At the first time the complete methods of lasers frequency shifts calculation, taking into account the influence of all the complex of laser parameters, are presented.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

Мачехін Юрій Павлович – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, начальник відділу ХДНДІМ, м. Харків