

## He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$ ЛАЗЕРЫ – ЭТАЛОНЫ ЕДИНИЦЫ ДЛИНЫ БЕЛАРУСИ, ГЕРМАНИИ И УКРАИНЫ. РЕЗУЛЬТАТЫ СЛИЧЕНИЙ

А.Е.Демидова, В.Б.Макаревич, У.Стерр, Ю.П.Мачехин,  
В.М.Смулаковский, Д.Н.Татьянко

Представлены результаты последних международных сличений стабилизированных по частоте He-Ne/ $^{127}\text{I}_2$  лазеров. Проведен анализ стабильности и воспроизводимости частоты излучения лазеров, входящих в состав государственных эталонов своих стран и использующихся в качестве стандартов длины волны для практической реализации определения метра в соответствии с рекомендациями СИРМ.

### ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с протоколом о сотрудничестве в области метрологии между Госстандартом Украины и Федеральным физико-техническим институтом (РТВ) Германии было принято совместное решение о проведении в Харьковском государственном научно-исследовательском институте метрологии (ХГНИИМ) сличений стабилизированных по частоте He-Ne/ $\text{I}_2$  лазеров. По взаимной договоренности в сличениях участвовало Государственное предприятие "ЦЭСМС" из Беларуси.

Все участвовавшие в сличениях лазеры входят в состав государственных эталонов своих стран и используются в качестве стандартов длины волны для практической реализации определения метра в соответствии с рекомендациями Международного комитета мер и весов (СИРМ) [1]. Целью проведенных сличений было определение метрологических характеристик этих лазеров и подтверждение возможности использования их в качестве эталонов длины.

Сличения проводились с 27 по 30 сентября 1999 г. в Харькове на базе лаборатории оптических и оптико-физических измерений ХГНИИМ, в которой хранит-

ся комплекс лазерных источников государственного эталона единицы длины Украины. В сличениях были использованы измерительная техника и оптические устройства, входящие в состав этого эталона.

Немецкая сторона была представлена лазером РТВ 03\86, который ранее принимал участие в международных сличениях лазеров данного типа, проводимых под руководством Международного бюро мер и весов (ВБРМ) [2,3]. Украинская сторона была представлена лазером ДЕ2, Беларусь – лазером БЕЛ1.

### РЕЗУЛЬТАТЫ СЛИЧЕНИЙ

Оптическая схема сличений была построена таким образом, что один из лазеров (РТВ 03\86) сравнивался с двумя другими лазерами (см. рис. 1, где приняты следующие обозначения: АПЧ – система автоподстройки частоты; УФП – усилитель фотоприемника).

Такая схема давала возможность проводить все измерения двумя парами лазеров одновременно. В течение каждого дня проводилось 2–3 измерения матриц  $4 \times 4$  разностных частот излучений лазеров  $\Delta f$  путем измерения частотных интервалов для всех комбинаций компонент группы  $d, e, f, g$  линии R(127)11-5 в  $^{127}\text{I}_2$ .

В табл. 1 приведены основные параметры лазеров, участвовавших в сличениях.

Для сравнительного анализа при одновременном измерении матриц разностных частот лазеры ДЕ2 и БЕЛ1 стабилизировались по одной и той же компоненте. В табл. 2 представлены результаты этих измерений, проводившихся в течение пяти дней, причем лазер РТВ 03\86 считался референтным.

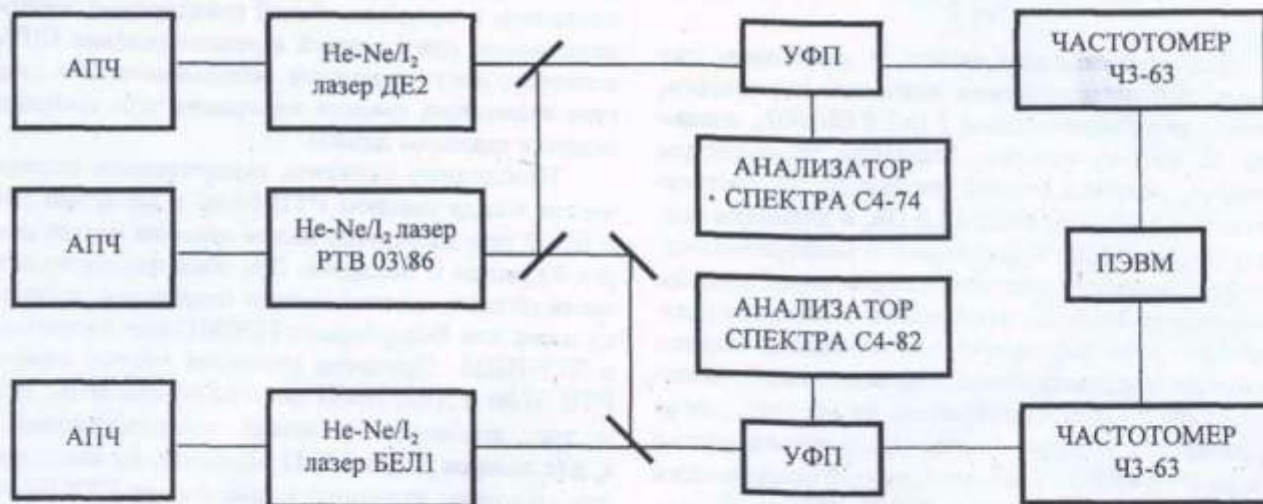


Рис. 1

Таблица 1

	ДЕ2; БЕЛ1	РТВ 03\86
Длина резонатора, см	24,5	34
Пропускание зеркал, %	0,2; 1,0	1,3; 1,6
Радиус кривизны зеркал, см	100	100
Длина активного элемента, см	15	20
Изготовитель	ХГНИИМ, Украина	Карл Цейсс Йена, Германия
Длина йодной ячейки, см	6,5	10
Изготовитель	ХГНИИМ, ИФ НАНУ	РТВ, Германия

Таблица 2

Лазер 1	Лазер 2	$\Delta f$ , кГц	$s$ , кГц	$P$ , мВт	Число измерений
ДЕ2	РТВ 03\86	15,4	1,0	12,2	11
БЕЛ1	РТВ 03\86	17,9	3,2	10,4	6

Примечание  $\Delta f = f_{\text{лазер1}} - f_{\text{лазер2}}$ ;  $s$  – среднеквадратическое отклонение (СКО) результата измерений;  $P$  – внутрирезонаторная мощность, соответствующая  $P_{\text{РТВ 03\86}} = 9,8$  мВт.

Рис. 2 иллюстрирует ход изменения  $\Delta f$  от измерения к измерению в течение пяти дней сличений. Каждая точка графика представлена с соответствующим значением СКО данного измерения.

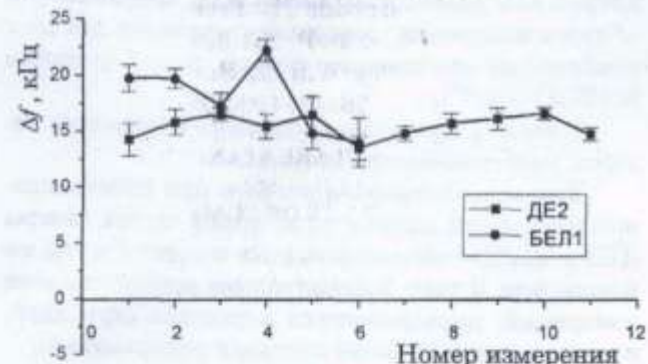


Рис. 2

Для окончательного расчета  $\Delta f$  необходимо учитывать степень изменения значений параметров, внесенных в Рекомендацию 1 (п.1.6 СИ-1997), влияющих на частоту лазеров. Значение температуры бокового отростка йодной ячейки  $15^\circ\text{C}$ , соответствующее давлению йода  $17,3$  Па, и девиация частоты  $\Delta\nu_{p-p} = 6$  МГц проверялись и подстраивались при необходимости для всех лазеров перед каждым измерением. Поэтому коррекции, связанные с изменением этих параметров, не вносились. Однако выходная мощность лазеров незначительно менялась от измерения к измерению, кроме того, длина резонатора и коэффициенты пропускания зеркал лазера РТВ 03\86 отличались от соответствующих параметров лазеров ДЕ2 и БЕЛ1. Это требовало

дополнительного исследования зависимости сдвига частоты лазеров от изменения внутрирезонаторной мощности, результаты которого приведены в табл. 3.

Таблица 3

Лазеры	ДЕ2		БЕЛ1		РТВ 03\86		
	$k$	$s$	$k$	$s$	$k$	$s$	
$\Delta f/\Delta P$ , кГц/мВт (от выходной мощности)	$d$	0,09	0,03	0,09	0,06	-0,04	0,02
	$e$	0,08	0,01	0,07	0,01	-0,04	0,02
	$f$	0,06	0,02	0,08	0,01	-0,06	0,01
	$g$	0,08	0,02	0,12	0,04	-0,09	0,01
Среднее значение $k$	0,08		0,09		-0,06		
СКО	0,01		0,02		0,02		
$k_p$ , кГц/мВт (от внутрирезонаторной мощности)	0,8		0,9		-0,4		

Эти результаты позволили внести поправку на внутрирезонаторную мощность в данные табл. 2 и получить:

$$\Delta f_1 = f_{\text{ДЕ2}} - f_{\text{РТВ 03\86}} = 13,4 \text{ кГц}; \quad s = 1,4 \text{ кГц};$$

$$\Delta f_2 = f_{\text{БЕЛ1}} - f_{\text{РТВ 03\86}} = 17,9 \text{ кГц}; \quad s = 3,5 \text{ кГц}.$$

Определение стабильности частоты излучения лазеров является традиционным при проведении сличений, поскольку это одна из важнейших характеристик лазеров – эталонов длины. Во время проведения данных сличений было проведено четыре серии измерений. Из-за ряда технических причин длительность этих серий была различной. Как и все матричные измерения, измерения стабильности велись двумя парами лазеров одновременно, что давало возможность оценки каждого из лазеров в течение достаточно большого промежутка времени. Результаты этих измерений представлены в табл. 4.

На рис. 3 представлен ход изменения разностных частот для самой длительной серии измерений.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ СЛИЧЕНИЙ

Проведенные сличения показали, что частоты всех лазеров, принимавших участие в сличениях, находятся в пределах общей стандартной неопределенности, приведенной в рекомендациях СИРМ, а значит, могут и дальше использоваться в качестве эталонных средств измерений для воспроизведения единицы длины.

Необходимо отметить существенное отличие частот между лазером РТВ 03\86 и лазерами ДЕ2 и БЕЛ1 при достаточно малом отличии частот лазеров Украины и Беларуси. Это объясняется практически полной идентичностью последних, поскольку лазер для Белорусского ЦЭСМС был изготовлен в ХГНИИМ. Причины различия частот лазеров РТВ 03\86 и ДЕ2, БЕЛ1 пока не совсем ясны. Кроме того, необходимо отметить, что коэффициенты  $k_p$  для лазеров ДЕ2 и БЕЛ1 оказались по знаку противоположны значению  $k_p$  для лазера РТВ 03\86.

Дата	Лазеры	Кол-во измерений	Время измерений							
			$\tau = 1$ с	$\tau = 3$ с	$\tau = 10$ с	$\tau = 30$ с	$\tau = 100$ с	$\tau = 300$ с	$\tau = 1000$ с	$\tau = 3000$ с
29.09.99	БЕЛ1 - РТВ 03/86	28000	$1,7 \cdot 10^{-11}$	$1,0 \cdot 10^{-11}$	$5,8 \cdot 10^{-12}$	$3,4 \cdot 10^{-12}$	$1,6 \cdot 10^{-12}$	$1,2 \cdot 10^{-12}$	$9,5 \cdot 10^{-13}$	$2,3 \cdot 10^{-12}$
29.09.99	ДЕ2 - РТВ 03/86	28000	$1,3 \cdot 10^{-11}$	$7,5 \cdot 10^{-12}$	$4,4 \cdot 10^{-12}$	$2,6 \cdot 10^{-12}$	$1,3 \cdot 10^{-12}$	$9,0 \cdot 10^{-13}$	$4,4 \cdot 10^{-13}$	$6,2 \cdot 10^{-13}$
1.10.99	БЕЛ1 - РТВ 03/86	11000	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$9,2 \cdot 10^{-12}$	$5,5 \cdot 10^{-12}$	$2,7 \cdot 10^{-12}$	$1,6 \cdot 10^{-12}$	$9,6 \cdot 10^{-12}$	$1,6 \cdot 10^{-12}$	
1.10.99	ДЕ2 - РТВ 03/86	11000	$1,3 \cdot 10^{-11}$	$8,1 \cdot 10^{-12}$	$4,4 \cdot 10^{-12}$	$2,7 \cdot 10^{-12}$	$1,7 \cdot 10^{-12}$	$7,8 \cdot 10^{-13}$	$4,0 \cdot 10^{-13}$	
1.10.99	БЕЛ1 - РТВ 03/86	2000	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$8,8 \cdot 10^{-12}$	$4,6 \cdot 10^{-12}$	$2,5 \cdot 10^{-12}$	$2,0 \cdot 10^{-12}$	$1,2 \cdot 10^{-12}$	$4,1 \cdot 10^{-13}$	
1.10.99	ДЕ2 - РТВ 03/86	2000	$1,3 \cdot 10^{-11}$	$7,8 \cdot 10^{-12}$	$4,2 \cdot 10^{-12}$	$2,7 \cdot 10^{-12}$	$1,1 \cdot 10^{-12}$	$6,2 \cdot 10^{-13}$	$5,7 \cdot 10^{-13}$	
2.10.99	БЕЛ1 - РТВ 03/86	7000	$1,5 \cdot 10^{-11}$	$8,7 \cdot 10^{-12}$	$5,0 \cdot 10^{-12}$	$3,1 \cdot 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{-12}$	$8,8 \cdot 10^{-13}$	$8,8 \cdot 10^{-13}$	$2,3 \cdot 10^{-12}$
2.10.99	ДЕ2 - РТВ 03/86	7000	$1,3 \cdot 10^{-11}$	$7,7 \cdot 10^{-12}$	$4,7 \cdot 10^{-12}$	$2,8 \cdot 10^{-12}$	$1,3 \cdot 10^{-12}$	$9,1 \cdot 10^{-13}$	$3,8 \cdot 10^{-13}$	$2,4 \cdot 10^{-12}$

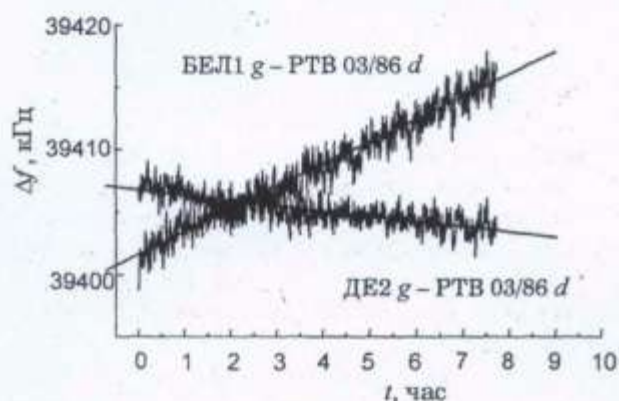


Рис. 3

Выяснение причин аномального характера зависимости  $k_p$  для лазеров ДЕ2 и БЕЛ1 требует дополнительного исследования.

Надо отметить, что лазер БЕЛ1 при непрерывной работе в течение нескольких часов имел направленный уход частоты (рис.3), что, по нашему мнению, было связано с изменением параметров системы автоподстройки частоты, таких как ноль интегратора или синхродетектора. Это подтверждается тем, что в ходе проведения сличений удалось

уменьшить уход частоты в три раза путем более тщательной регулировки и настройки соответствующих узлов АПЧ.

#### Список литературы

1. Revisoin of the *mise en pratique* of the definition of the metre. Recommendation adopted by the Comite International des Poids et Mesures at its 86th meeting. Recommendation 1 (C1-1997).
2. Chartier J.-M., Darnedde H., Frennberg M. a.o. //Metrologia. -1992. -29. -P. 331-339.
3. Darnedde H., Rowley W.R.C., Bertinnetto F. a.o. //Metrologia. -1999. -36. -P. 199-206.

#### He-Ne<sup>127</sup>I<sub>2</sub> LASERS, WHICH ARE STANDARDS OF THE UNIT OF LENGTH OF BYELORUSSIA, GERMANY AND UKRAINE. THE RESULTS OF COMPARISONS

A.Y.Demidova, V.B.Makarevich, U.Sterr, Y.P.Machehkin, V.M.Smulakhovsky, D.N. Tatianko

The results of the last international comparisons of frequency-stabilized He-Ne<sup>127</sup>I<sub>2</sub> lasers are given. The analysis of stability and realization of radiation optical frequency of the lasers, which are the part of the national standards of their countries and are used as the standard of wavelength for practical realization of the unit of length according to CIPM recommendations has been conducted.

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Демидова Анна Юхимівна –

начальник відділу Державного підприємства "ЦЭСМС", м. Мінськ, Білорусь

Макаревич Володимир Броніславович –

інженер I категорії Державного підприємства "ЦЭСМС", м. Мінськ, Білорусь

Стерр Уве –

доктор, науковий співробітник лабораторії довжини Федерального фізико-технічного інституту, м. Брауншвейг, Німеччина

Мачехін Юрій Павлович –

кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, начальник ХДНДІМ, м. Харків

Смулаковський Володимир Михайлович –

провідний інженер ХДНДІМ, м. Харків

Татьянко Дмитро Миколайович –

інженер II категорії ХДНДІМ, м. Харків