

УДК 389.64:621.373.826

ЗВІРЕННЯ He-Ne/I₂ ЛАЗЕРІВ З ПОПЕРЕЧНИМ ВЧ РОЗРЯДОМ З He-Ne/I₂ ЛАЗЕРОМ ДЕРЖАВНОГО ЕТАЛОНА ОДИНИЦІ ДОВЖИНИ УКРАЇНИ

О.В. Бойко, Н.М. Качалова, А.М. Негрійко, Л.П. Яценко (ІФ НАНУ, Київ),
Ю.П. Мачехін, В.М. Смулаковський (ДНВО "Метрологія", Харків)

Наведено результати звірень стабілізованого He-Ne/I₂ лазера з накачкою поперечним високочастотним розрядом ІФ-2 (ІФ НАНУ, Київ) з лазером ДЕ-3, який входить до складу державного еталона одиниці довжини (ДНВО "Метрологія", Харків).

Гелій-неонові лазери, стабілізовані за частотою по резонансах насиченого поглинання в йоді, широко використовуються у метрологічній практиці, зокрема, у первинних еталонах одиниці довжини для практичної реалізації "mise en pratique" визначення метра [1] як шляху, що проходить світло у вакуумі за 1/299792458 с [2]. Їх основні метрологічні характеристики добре відомі, а оптимальні конструктивні параметри регламентуються рекомендаціями СІ-1997 [1]. Разом з тим, робота над удосконаленням таких лазерів продовжується. Зокрема, у роботі [3] було показано, що застосування поперечного високочастотного розряду для збудження гелій-неонового лазера має деякі переваги порівняно із збудженням сталим струмом і може бути використане при розробці високостабільних лазерів метрологічного призначення. Важливим етапом у розробці високостабільних лазерів, призначених для відтворення одиниці довжини, є звірення їх з еталонними лазерами. У червні 1998 р. виконано звірення лазера з високочастотною накачкою ІФ-2, розробленого в Інституті фізики НАН України, з лазером ДЕ-3, який входить до складу державного еталона одиниці довжини (ДНВО "Метрологія", Харків). Метою цієї роботи було визначення основних метрологічних характеристик лазера ІФ-2 шляхом порівняння з лазером ДЕ-3, основні метрологічні характеристики якого підтверджено рядом міжнародних звірень [4,5]. Результати цих звірень наводяться у даній роботі.

Як відомо, перші He-Ne лазери збуджувалися поздовжнім ВЧ розрядом. Такий спосіб збудження має ряд істотних вад, пов'язаних з: локальним перегрівом трубки поблизу катодів, що знижує термін служби активного елемента; високим рівнем ВЧ потужності, необхідним для забезпечення достатнього рівня інверсії; поздовжньою неоднорідністю розряду та ін. Тому цей метод збудження був швидко витіснений більш зручним – збудженням розрядом сталого струму (РСС). В свою чергу, РСС також при-
таманні істотні недоліки: високі робочі напруги, внутрішні електроди, збудження різноманітних

плазмових коливаль, просторовий розділ компонентів суміші, поздовжній дрейф робочих атомів та ін. [6].

У роботах [6-9] показано, що більшість указаних недоліків можна усунути, використовуючи поперечне ВЧ або НВЧ збудження.

Поперечний НВЧ розряд в He-Ne лазерах забезпечує більш рівномірний (порівняно з РСС) розподіл підсилення по перетину розрядного каналу. Оптимальний тиск газової суміші при збудженні поперечним НВЧ розрядом вищий, ніж при збудженні РСС, що сприяє підвищенню ресурсу такого лазера та вихідної потужності випромінювання. В умовах поперечного НВЧ розряду завдяки високій частоті коливаль та поперечному напрямку збуджуючого поля ефекти поздовжнього дрейфу заряджених часток та розділення компонентів суміші не спостерігаються.

Істотною перевагою ВЧ та НВЧ поперечних розрядів в He-Ne лазерах є практична відсутність НЧ коливаль плазми газового розряду (реактивних коливаль, страт та ін.). Тому у лазерах з НВЧ накачкою разом з підвищенням вихідної потужності суттєво зменшується рівень флуктуацій потужності випромінювання [6-9]. Останній факт є основною причиною того, що стабільність частоти випромінювання He-Ne/¹²⁷I₂ лазерів, накачка активного середовища яких здійснюється високочастотним розрядом, вища, ніж у аналогічних лазерах з накачкою сталим струмом [3].

Схему лазера ІФ-2 наведено на рис. 1. В резонаторі, зібраному на основі трьох інварових стрижнів, встановлено: лазерну трубку (ЛТ) з накачкою поперечним високочастотним розрядом (на базі серійного лазера ЛГІ-201); дзеркало (r1); вихідне дзеркало (r2), прикріплене до п'єзокерамічного коректора (ПК); поглинаючу комірку (КП), заповнену ¹²⁷I₂. На ПК подавалися модулююча напруга та сигнал відпрацювання з системи автоматичного підстроювання частоти (АПЧ). З метою підвищення пасивної стабільності частоти резонатор було закріплено на масивній основі, усі проміжки між елементами резонатора ізолювано від навколишнього середовища. Для встановлення необхідного тиску ¹²⁷I₂ бічний паросток поглинаючої комірки охолоджувався за допомогою елемента Пельтьє (ЕП). Система автоматичної стабілізації температури (САСТ) дозволяла регулювати температуру елемента Пельтьє в межах від кімнатної до 0 °С з точністю 0,01 °С.

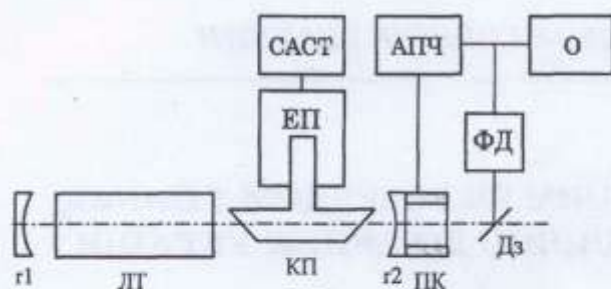


Рис. 1

Частина випромінювання лазера, відбиваючись від напівпрозорого дзеркала (Дз), подавалась на фотодіод (ФД), сигнал з якого надходив до системи АПЧ, яку було зібрано за схемою екстремального регулювання. Коефіцієнт підсилення по розімкненому ланцюгу зворотнього зв'язку системи АПЧ складав ~150 дБ, частота зрізу ~100 Гц. Фільтри забезпечували коефіцієнти пригнічення першої та другої гармонік частоти модуляції по відношенню до третьої ~100 дБ. Як сигнал помилки використовувався сигнал третьої гармоніки частоти модуляції у вихідній потужності лазера. Візуальний контроль сигналів третьої гармоніки здійснювався за допомогою осцилографа (О).

Основні параметри лазерів ІФ-2 та ДЕ-3 наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Параметр	Лазер ІФ-2	Лазер ДЕ-3
Довжина резонатора, мм	450	230
Коефіцієнт відбивання дзеркал, %:		
r1	99,8	99,7
r2	99,0	99,0
Радіус кривизни дзеркал, см:		
R1	200	100
R2	100	100
Довжина поглинання, см	6,5	6,5
Вихідна потужність, мВт	130	52
Внутрішньорезонаторна потужність, мВт	13	5,2
Частота модуляції, кГц	1,302	1,627

Структурну схему вимірювального комплексу наведено на рис. 2. Випромінювання лазерів ІФ-2 та ДЕ-3, проходячи через систему напівпрозорих дзеркал (Дз. 1 та Дз. 2), збивалось на лавинному фотодіоді (ЛФД). На його виході отримувався сигнал биття, частота якого дорівнювала різниці частот випромінювання лазерів. Сигнал подавався на спектроаналізатор (СА) та частотомір (ЧМ) і реєструвався системою КАМАК.

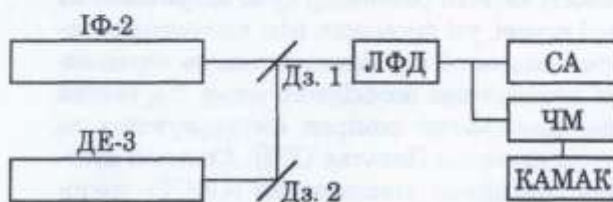


Рис. 2

Для коректної оцінки стабільності та відтворюваності частоти випромінювання лазера необхідно знати ступінь впливу тих параметрів, які, незначно змінюючись у режимі стабілізації, можуть призвести до помітних зсувів частоти. Такими параметрами є тиск пари йоду в комірці, величина девіації частоти випромінювання та потужність лазера. Для лазера ДЕ-3 величини зсувів неодноразово вимірювалися при проведенні міжнародних звірень. Тому ДЕ-3 було обрано як опорний лазер і протягом усіх вимірювань його параметри залишалися незмінними та відповідали рекомендаціям СІ-1997 [1]. Протягом цих звірень вимірювалися зсуви частоти лазера ІФ-2 у залежності від зміни тиску пари йоду та девіації частоти (модуляційний зсув). Вимірювання проводилися відповідно до методик ВІРМ.

Під час проведення вимірювань зсуву, пов'язаного зі зміною одного з параметрів, змінювали тільки цей параметр, інші ж залишалися незмінними та знаходилися в рекомендованому СІ-1997 діапазоні. Величина девіації частоти варіювалася від 4 до 8 МГц. Температура бічного паростка йодної комірки змінювалася в діапазоні від 12 до 17 °С, що відповідало зміні тиску пари йоду в межах 13 – 21 Па. Для кожного параметра, у залежності від якого визначалися зсуви, проводилися по сім серій вимірювань середньої частоти биттів, в кожній з яких цей параметр залишався незмінним. Так, при вимірюванні модуляційних зсувів девіація частоти змінювалася з кроком 1 МГц. Для перевірки на відсутність дрейфів частоти випромінювання лазера в першій та останній серіях встановлювалася девіація 6 МГц. Під час вимірювання зсувів, зумовлених зміною тиску пари йоду в комірці, температура бічного паростка змінювалася з кроком 1 °С. Кожна серія складалася з чотирьох вимірювань (для кожної з d, e, f, g компонент). Коли лазер ІФ-2 стабілізувався за d, e, f компонентами, лазер ДЕ-3 – за g компонентою, а при стабілізації ІФ-2 за g компонентою, ДЕ-3 стабілізувався за d компонентою. В кожній серії для кожної компоненти знімалися по три послідовних показання частотоміра, час усереднення якого становив 10 с; потім обчислювалися середня частота $f_{\text{ср}}$ та середнє квадратичне відхилення (СКВ) S результату вимірювань згідно з формулами:

$$f_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i; \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{\text{ср}} - f_i)^2}{(n-1)}}, \quad (2)$$

де f_i – i-те показання частотоміра; n – кількість показань.

Методом найменших квадратів за отриманими експериментальними даними були знайдені відносні зсуви частоти стабілізованого лазера ІФ-2 для кожної компоненти та їх стандартні девіації. Отримані результати наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Характеристика	Компонента	Величина зсуву	S
$\Delta f / \Delta \Theta_{I_2}$, кГц/°C	d	-16,4	2,1
	e	-14,4	2,2
	f	-13,7	3,3
	g	-12,5	1,8
Середнє значення S		-14,2	1,6
$\Delta f / \Delta P_{I_2}$, кГц/Па	d	-10,7	2,9
	e	-9,4	2,7
	f	-9,0	3,3
	g	-8,2	1,4
Середнє значення S		-9,3	1,0
$\Delta f / f_w$, кГц/МГц	d	-7,3	3,9
	e	-12,0	4,4
	f	-11,2	3,7
	g	-14,1	2,4
Середнє значення S		-11,2	2,8

У табл. 2 прийнято такі позначення: $\Delta f / \Delta \Theta_{I_2}$ – коефіцієнт за зміною температури йоду; $\Delta f / \Delta P_{I_2}$ – коефіцієнт за зміною тиску йоду; $\Delta f / f_w$ – коефіцієнт за зміною амплітуди модуляції.

Протягом трьох днів було проведено шість серій вимірювань матриць різницевої частоти для групи d, e, f, g компонент. Елементами матриць були частоти биттів лазерів. Для кожної з комбінацій (крім діагональних) виконувалось п'ять вимірювань частоти биттів підряд, потім, згідно з формулами (1) та (2), обчислювалися середня частота $f_{\text{ср}}$ та СКВ S. Далі обчислювалися різниці частот $\Delta f = f_{\text{ср } 2} - f_{\text{ср } 3}$ між лазерами ІФ-2 та ДЕ-3 як середнє значення піврізниць між над- та піддіагональними елементами матриць, що відповідали однаковим парам компонент (симетричним відносно діагоналі елементам). Отримані результати наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Дата	Час	Δf , кГц	S, кГц	Θ_{I_2} , °C		f_w , МГц		P, мкВт	
				ДЕ-3	ІФ-2	ДЕ-3	ІФ-2	ДЕ-3	ІФ-2
28.06.98	14 ¹⁵	+5,7	3,2	15,10	15,05	6,0	6,0	52	130
28.06.98	15 ³⁰	+3,7	2,3	15,10	15,06	6,0	6,0	52	130
28.06.98	16 ³⁰	+3,7	2,6	15,10	15,05	6,0	6,0	52	130
29.06.98	16 ⁰⁰	-3,4	2,3	15,10	15,07	6,0	6,0	52	130
30.06.98	13 ¹⁰	-0,8	2,6	15,10	15,09	6,0	6,0	52	130
30.06.98	15 ⁴⁰	-1,7	1,3	15,10	15,08	6,0	6,0	52	130

Середня різниця частот між лазерами ІФ-2 та ДЕ-3 становила 1,2 кГц, а СКВ – 3,2 кГц.

Вимірювання стабільності частоти проводилися для часів усереднення 10 та 100 с при стабілізації лазерів за e та f компонентами. Для обчислення стабільності частоти використовувався параметр Аллана $\sigma(2, \tau)$:

$$\sigma(2, \tau) = \frac{1}{\nu} \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (f_i - f_{i-1})^2 / 2(N-1)},$$

де τ – час усереднення; f_i – i-ті вимірювання частоти биттів; ν – оптична частота; N – кількість вимірювань частоти.

Температура бічного паростка йодної комірки лазера ІФ-2 підтримувалась у межах $15,05 \pm 0,01$ °C, а ДЕ-3 – $15,10 \pm 0,1$ °C. Девіація частоти випромінювання обох лазерів складала $D = 6,0 \pm 0,1$ МГц. Для вказаних вище часів усереднення отримані значення $\sigma(2, \tau)$ становили відповідно $2,1 \cdot 10^{-12}$ та $7,9 \cdot 10^{-13}$.

Таким чином, у результаті проведених звірень He-Ne/I₂ лазерів ДЕ-3 та ІФ-2 досліджено відмінність їх частот випромінювання, відтворюваність і стабільність частоти лазерного випромінювання, коефіцієнти зсувів частоти лазерного випромінювання лазера ІФ-2 у залежності від зміни температури бічного паростка йодної комірки, тиску пари йоду, девіації частоти. Вимірювання проведено згідно з умовами Рекомендації С-1 Міжнародного Комітету з мір та ваги (МКМВ). Встановлено, що основні метрологічні характеристики He-Ne/I₂ лазерів – ДЕ-3, який входить до складу державного еталона одиниці довжини, та ІФ-2 відповідають Рекомендації С-1 МКМВ.

Список літератури

1. Revision of the mise en pratique of the definition of the metre. Recommendation adopted by the Comité International des Poids et Mesures at its 86th meeting. Recommendation 1 (CI-1997).
2. Documents Concerning the New Definition of the Metre //Metrologia. -1984. -V.19. -P.163-177.
3. Бойко О.В., Лихоліт М.М., Негрійко А.М., Яценко Л.П. //Український метрологічний журнал. -1998. -Вип.4. -С. 37-39.
4. Chartier J.-M., Chartier A. //Metrologia. -1997. -V.34. -P.297-300.
5. Смулаковський В.М., Навратіл В. //Український метрологічний журнал. -1998. -Вип. 4. -С. 51-52.
6. Тучин В.В. Динамические процессы в газоразрядных лазерах. -М.: Энергоатомиздат, 1990. -248 с.
7. Геллер В.М., Гриф Г.И., Хрусталева В.А. //Автоматизация. -1984. -№1. -С. 35-45.
8. Муллер Я.Н. //Изв. вузов СССР. Сер. Радиоэлектроника. -1979. -Т.22, №106. -С.55-68.
9. Геллер В.М., Гриф Г.И., Хрусталева В.А. //Приборы и техника эксперимента. -1984. -№4. -С. 176-179.

COMPARISON OF He-Ne/I₂ LASERS WITH TRANSVERSE HIGH-FREQUENCY DISCHARGE WITH He-Ne/I₂ LASER OF THE NATIONAL STANDARD OF THE LENGTH UNIT OF UKRAINE

O.V. Boiko, N.M. Kachalova, A.M. Negriyko, L.P. Yatsenko, Y.P. Machekhin, V.M. Smulakhovsky

The results of the comparisons of the stabilized He-Ne/I₂ laser pumped with transverse high-frequency discharge IF-2 (The Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine) with laser DE-3 which is a component of the national standard of the length unit of Ukraine (SSIA "Metrology", Kharkiv).