

тельных единицах. Из характеристики $U(P)$ видно, что при $U \lesssim 100$ мВ она близка к линейной, затем начинается заметное насыщение. На рис. 1 сплошной линией показана зависимость $\alpha(U)$ вычисленная при помощи (1) с приведенными выше

ЛИТЕРАТУРА

1. Wall D. L., Manz A. W. Simple Technique for Characterizing Nonlinear Responsivity of Infrared Detectors.— Appl. Opt., 1980, vol. 19, p. 1569—1570.
2. Coslivi L., Righini F. Fast Determination of the Nonlinearity of Photodetectors.— Appl. Opt., 1980, vol. 19, p. 3201—3203.
3. Загоруйко А. С. Результаты сравнения релаксационных методов многомерной минимизации на ЭВМ.— Автометрия, 1979, № 5.
4. Загоруйко А. С. О комбинированных с обобщенным методом хорд способах многомерной минимизации.— Автометрия, 1980, № 5.

Поступило в редакцию 8 апреля 1981 г.

УДК 621.378

А. Я. ПАЮРОВ, В. А. ПЕРЕБЯКИН, Е. Г. ЧУЛЯЕВА
(Рязань)

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА ФЛУКТУАЦИЙ ЧАСТОТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ОДНОЧАСТОТНЫХ СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ЛАЗЕРОВ

Одной из основных характеристик одночастотных стабилизированных лазеров является нестабильность частоты излучения. В работах [1, 2] рассмотрены флуктуации частоты излучения лазеров, характеризующие кратковременную нестабильность. Однако при решении задач прикладного характера большую роль играет долговременная нестабильность частоты. В статье [3] теоретически рассмотрены флуктуации частоты газового лазера, характеризующие долговременную нестабильность, но основное внимание все же уделено путям повышения кратковременной стабильности частоты.

Задача данной работы заключалась в исследовании спектра флуктуаций частоты излучения одночастотных стабилизированных лазеров с целью выявления возмущающих факторов и их роли в дестабилизации частоты за продолжительный промежуток времени (8 ч и более). Распространенным методом исследования спектра флуктуаций частоты является метод оптического гетеродинамирования [3—5] с последующим определением нестабильности частоты через среднеквадратическое отклонение (СКО). Это справедливо, если флуктуации частоты излучения носят случайный характер. Как правило, при изменении частоты лазерного излучения имеется детерминированная составляющая, мало заметная на фоне случайных флуктуаций частоты. Нестабильность частоты при этом может быть более строго определена с помощью параметра Аллена [6]. Зависимость параметра Аллена от времени усреднения позволяет обнаружить аperiodические составляющие в спектре возмущений [3]. Анализ периодических возмущений частоты излучения возможен с помощью автокорреляционной функции. Автокорреляционная функция представляет собой более эффективное средство выявления детерминированных процессов, которые могут маскироваться случайным фоновым шумом. Для дискретной обработки автокорреляционная функция процесса записывается следующим образом [7]:

$$K_{\Omega}(t) = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^{n-m} \dot{\Omega}(t_i) \dot{\Omega}(t_{i+m}),$$

где n — число дискретных отсчетов, $t = m\Delta t$, t — текущее время, Δt — время усреднения, $m = 0, 1, 2, \dots$

В настоящей работе с помощью указанных методов исследовались флуктуации частоты серийно выпускаемого одночастотного стабилизированного лазера ЛГ-149-1. Частота лазерного излучения в этом приборе стабилизируется по центру линии поглощения в неоне-20 [8].

Измерения частоты биений двух одночастотных стабилизированных лазеров проводились на установке, аналогичной описанной в работе [5]. Для непрерывного измерения частоты биений использовались два частотомера, причем «мертвое» время

Таблица 1

Частота биений между опорным и испытуемым лазерами ЛГ-149-1

Время усреднения, с	1	10	$3,6 \cdot 10^3$
Частота биений, МГц	12,5	10,9	32,27
	12,2	11,4	19,75
	12,6	12,2	19,51
	12,3	12,4	15,51

	12,7	11,6	13,76

Таблица 2

Нестабильность частоты лазера ЛГ-149-1 для разных времен усреднения

Время усреднения, с	Нестабильность частоты, вычисленная по СКО	Нестабильность частоты, вычисленная по параметру Аллена
1	$3 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-10}$
10	$1,3 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-10}$
$3,6 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-10}$

одного частотомера совпадало со временем счета другого. Регистрация сигналов проводилась цифropечатающим устройством Ф5033К.

В табл. 1 приведены данные измерений разностной частоты для времени усреднения. Из таблицы можно сделать вывод, что систематическое смещение разностной частоты со временем происходит со скоростью 4,6 МГц/ч. Соответствующие различным временам усреднения значения нестабильности частоты, вычисленные по параметру Аллена, приведены в табл. 2. Наибольшее значение нестабильности частоты при времени усреднения $\tau = 3,6 \cdot 10^3$ с, следовательно, тепловой дрейф лазера вносит решающий вклад в нестабильность частоты приборов данного типа.

В табл. 2 представлены значения нестабильности частоты, вычисленные с учетом среднеквадратического отклонения. Из сравнения результатов, приведенных в таблице, следует, что нестабильность частоты, оцененная по параметру Аллена, примерно на порядок меньше для $\tau = 10$ с и $\tau = 3,6 \cdot 10^3$ с, чем оцененная по квадрату среднеквадратического отклонения. Для усреднения $\tau = 1$ с значения нестабильности частоты, вычисленные по параметру Аллена и СКО, примерно равны.

На рис. 1 представлена зависимость параметра Аллена как функция времени усреднения в логарифмическом масштабе для прибора ЛГ-149-1. Из графика рис. 1, а видно, что в приборе ЛГ-149-1 белый шум системы АПЧ преобладает над шумом излучателя лазера [3], а, кроме того, фликкер-шум вносит решающий вклад в нестабильность частоты.

По результатам измерений частоты биений строилась автокорреляционная функция процесса флуктуаций частоты для времени усреднения $\tau = 1$ с (рис. 2). Автокорреляционная функция такого вида характерна для белого шума с гармонической составляющей [7]. По графику рис. 2 можно определить время установления случайного процесса флуктуаций частоты биений лазера. Это время соответствует приближению автокорреляционной функции к нулю. Для рассматриваемого прибора характерным временем будет $\tau = 10$ с [2]. Период гармонической составляющей примерно равен 60 с. Колебания частоты биений с таким периодом являются результатом флуктуаций тока разряда в активном элементе.

С целью повышения стабильности частоты в приборе ЛГ-149-1 в конструкцию резонатора и системы АПЧ были внесены изменения: на 10 мм уменьшена длина резонатора, зеркало крепилось на металлической втулке, которая при разогреве резонатора частично компенсировала изменение его длины. Кроме того, был заменен пьезоэлемент КИ-1 мембранного типа на пьезофакет ПИ-4. В системе АПЧ изменена характеристика усилителя (полоса усилителя уменьшена с 1200 до 50 Гц). Это связано с тем, что из-за наличия переменного магнитного поля поглощение в ячейке непостоянно. Изменение поглощения, вызванное магнитным полем, приводит к тому, что появляется дополнительный сигнал на частоте, вдвое большей частоты переключения поля. При наличии узкополосного усилителя этот вид помех не окажет влияния на систему АПЧ. Вследствие изменения характеристики усилителя соотношение сигнал/шум возрастает примерно в 3 раза.

В табл. 3 представлены результаты измерения частоты биений доработанного прибора для разных времен усреднения. В табл. 4 указаны значения нестабильности

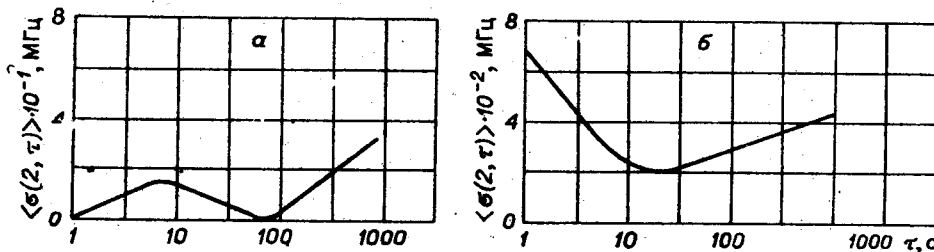


Рис. 1.

Таблица 3

Частота биений между опорным и испытываемым доработанным лазером ЛГ-149-1

Время усреднения, с	1	10	$3,6 \cdot 10^3$
Частота биений, МГц	7,0	7,0	4,3
	6,9	7,3	5,7
	6,9	7,2	6,9
	6,7	7,0	7,3

	6,7	7,2	9,2

Таблица 4

Нестабильность частоты доработанного лазера ЛГ-149-1 для разных времен усреднения

Время усреднения, с	Нестабильность частоты, вычисленная по СКО	Нестабильность частоты, вычисленная по параметру Аллена
1	$3 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-10}$
10	$5 \cdot 10^{-10}$	$0,3 \cdot 10^{-10}$
$3,6 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$0,6 \cdot 10^{-10}$

частоты этого прибора для времени усреднения $\tau = 1$ с, $\tau = 10$ с, $\tau = 3,6 \cdot 10^3$ с, вычисленные с использованием среднеквадратического отклонения. Наибольшее значение нестабильности частоты получено для времени усреднения $\tau = 3,6 \cdot 10^3$ с, т. е. и в этом случае дрейф вносит решающий вклад в нестабильность частоты. Скорость дрейфа в доработанном приборе снизилась и стала равной 0,7 МГц/ч.

Значения нестабильности частоты, вычисленные с помощью параметра Аллена (см. табл. 4), меньше значений из табл. 3, как и в случае недоработанного прибора. Характер изменения параметра Аллена со временем усреднения для доработанного прибора, показанный на рис. 1, б, указывает на то, что белый шум системы АПЧ примерно равен шуму излучателя лазера [3], и, кроме того, наблюдается значительное влияние на нестабильность частоты фликкер-шума излучателя лазера. Автокорреляционная функция, вычисленная по формуле (1) для доработанного прибора, аналогична автокорреляционной функции, изображенной на рис. 2, что также указывает на наличие гармонической составляющей в спектре флуктуаций частоты биений.

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод, что в одночастотных стабилизированных лазерах, наряду со случайными флуктуациями частоты излучения, систематический дрейф оказывает значительное влияние на нестабильность частоты. Кроме того, в результате колебаний тока разряда происходят периодические изменения частоты биений, которые также увеличивают нестабильность частоты излучения лазера.

Изменения в конструкции прибора ЛГ-149-1 привели к тому, что скорость дрейфа в доработанном приборе значительно уменьшилась, снизилась нестабильность частоты, уменьшилась техническая ширина линии.

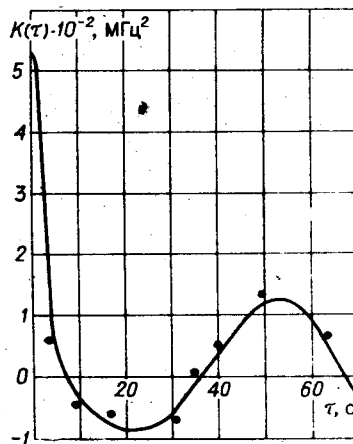


Рис. 2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Милушкин Г. А., Трошин Б. И. Исследование флуктуаций частоты гелий-неонового лазера на длину волны 0,63 мкм в технической области спектра.— Квант. электроника, 1974, № 1.
2. Багаев С. Н. и др. Некоторые результаты исследования стабильности частоты генерации газовых лазеров на длинах волн 0,63; 1,5; 3,39 и 9,6 мкм.— Опт. и спектр., 1972, т. XXXII, вып. 4.
3. Летохов В. С., Павлик Б. Д. Флуктуации частоты в газовом лазере с нелинейным поглощением.— Квант. электроника, 1972, № 4.
4. Капралов В. П. Регистрация спектра излучения в рабочем эталоне на основе газовых лазеров.— Метрология, 1978, № 2.
5. Борисовский С. П. и др. Измерение стабильности и воспроизводимости частоты генерации газовых лазеров.— Измерит. техника, 1977, № 8.
6. Аллен Д. Статистические характеристики атомных стандартов частоты.— ТИИЭР, 1966, т. 54, № 2.
7. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов.— М.: Мир, 1974.
8. Капралов В. П., Привалов В. Е., Чуляева Е. Г. Исследование стабильности длины волны излучения лазера с внешней неоновой ячейкой поглощения.— Квант. электроника, 1980, т. 7, № 8.

Поступило в редакцию 16 сентября 1980 г.;
окончательный вариант — 25 февраля 1981 г.