

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЧАСТОТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ИЗЛУЧЕНИЯ He-Ne ЛАЗЕРОВ

Источники оптического когерентного излучения, характеризующиеся высокими метрологическими параметрами, находят широкое применение в интерферометрии в квантовых стандартах частоты оптического диапазона, связи локации и т. д., где существенную роль играют характеристики нестабильности частоты генерации лазеров. Стабильность частоты оптических квантовых генераторов зависит от многих причин, среди которых определяющими являются изменение температуры, колебания тока накачки, вибрационно-акустические воздействия, изменения атмосферного давления и влажности окружающей среды и т. д. Суммарное воздействие этих факторов обуславливает типичную нестабильность частоты излучения гелиево-неоновых лазеров порядка 10^{-6} .

Существующие методы измерения параметров лазерного излучения, относительной нестабильности наряду со своими преимуществами (широкий диапазон измеряемых длин волн) имеют и существенные недостатки (малое частотное разрешение), что не позволяет исследовать структуру кратковременных флуктуаций лазерного излучения. В связи с этим проблема разработки методов и средств измерения кратковременных и долговременных флуктуаций частоты лазеров является актуальной. В данной работе на основе метода фотогетеродинамирования проведены исследования структуры частотных флуктуаций He-Ne лазеров.

Рассмотрим процесс фотосмещения двух когерентных излучений с частотами ν_1 и ν_2 , описываемых амплитудами электрической составляющей электромагнитного поля $E_1 \cos(2\pi\nu_1 t)$ и $E_2 \cos(2\pi\nu_2 t)$. Если два таких пучка направить в фотоприемник, то в соответствии с законом Столетова его фототок $i(t)$ будет прямо пропорционален интенсивности светового потока [1]:

$$I(t) \approx (E_1 \cos \omega_1 t + E_2 \cos \omega_2 t)^2 = \frac{E_1^2}{2} + \frac{E_2^2}{2} + E_1 E_2 \cos[2\pi(\nu_1 - \nu_2)t] + E_1 E_2 \cos[2\pi(\nu_1 + \nu_2)t] + \frac{E_1}{2} \cos[2\pi(2\nu_1)t] + \frac{E_2}{2} \cos[2\pi(2\nu_2)t]. \quad (1)$$

Ввиду ограниченной полосы частот фотоприемника фототоки, вызываемые тремя последними составляющими суммарного потока (с частотами, соответственно, $\nu_1 + \nu_2$, $2\nu_1$ и $2\nu_2$), не могут быть зарегистрированы;

два первых слагаемых ($E_1^2/2$, $E_2^2/2$) образуют постоянную составляющую, которая и регистрируется при обычной фотоэлектрической регистрации световых потоков. Наиболее информативным в интересующем нас аспекте является третье слагаемое, содержащее полную информацию о частотно-фазовых соотношениях обоих световых пучков:

$$E_1 E_2 \cos[2\pi(\nu_1 - \nu_2)t] \approx \sqrt{I_1 I_2} \cos[2\pi(\nu_1 - \nu_2)t]. \quad (2)$$

где I_1 , I_2 – интенсивности сигнального и гетеродинного излучения соответственно.

Рассмотренная выше ситуация используется на практике только для анализа частотно-фазовых соотношений в пучках двух одночастотных лазеров (обычно стабилизированных по частоте) или излучения двухчастотных лазеров.

Рассмотрим применение метода фотогетеродинамирования для анализа особенностей спектра излучения одномодовых и одночастотных лазеров. Для этого необходим второй лазер-гетеродин, стабильность частоты ν_2 и амплитуды E_2 , излучения которого существенно выше, чем исследуемого. При этом условии спектр фототока разностной частоты $W_{\text{пр}}$, наблюдаемый на спектроанализаторе, прямо пропорционален спектру исследуемого лазера. Фотогетеродинамирование переносит исследуемый сигнал в область разностной частоты $W_{\text{пр}} = (\nu_1 - \nu_2)$, где электронные шумы значительно меньше, что и позволяет более точно анализировать исследуемое излучение. Нестабильность излучения гетеродинного лазера приводит к дополнительному (ложному) уширению исследуемого спектра из-за свертки со спектром гетеродина.

Таким образом, рабочий диапазон частот фотогетеродинного метода сверху ограничен электронным трактом (включая, разумеется, фотоприемник) и обычно не превышает нескольких гигагерц (с использованием быстродействующих фотодетекторов до 10 ГГц), а снизу – нестабильностью частоты (и амплитуды) лазера-гетеродина. Предельные возможности гетеродинного метода реализуются при использовании в качестве опорного генератора (стандарта) He-Ne лазера, стабилизированного по провалу Лэмба от внутренней поглощающей ячейки с метаном и обладающего относительной нестабильностью $\sim 10^{-12}$.

На рис. 1 приведена структурная схема разработанной установки по анализу длины волны лазерного излучения [2]. Излучение исследуемого лазера падает на полупрозрачную пластину, на которую также поступает после прохождения анализатора (выделяется поле с нужной поляризацией) излучение опорного лазера. Оба излучения пространственно совмещаются и фокусируются на фотодетекторе. В результате фотогетероди-

нирования на выходе фотодетектора формируется выходной электрический сигнал, в спектре которого присутствует разностная частота входных излучений (2). С выхода фотодетектора сигнал поступает на спектроанализатор СК4–61 с полосой регистрируемых сигналов 1.6 ГГц и на вход измерителя частоты на основе электронно-счетного частотомера ЧЗ–34А с блоком делителя частоты ЯЗЧ–51 и диапазоном регистрируемых частот 4.5 ГГц. Спектроанализатор использовался для юстировки оптической схемы установки и проведения измерений времени установления стационарного режима.

Абсолютные значения флуктуаций частоты даже высокостабильных лазеров превышают сотни мегагерц, кроме того значение промежуточной частоты $W_{пр}$ определяется разностью частот лазера-гетеродина и измерительного. В связи с этим приходится выбирать промежуточную частоту $W_{пр}$ достаточно высокой с тем, чтобы удовлетворить выше перечисленным требованиям. Эти требования вызывают определенные трудности с подбором широкополосных фотодетектора и измерительных устройств с необходимым диапазоном и разрешением.

В качестве фотодетектора использовался лавинный фотодиод ЛФД–2 со встроенным динамическим смещением. Введение динамического смещения позволило повысить чувствительность фотоприемника

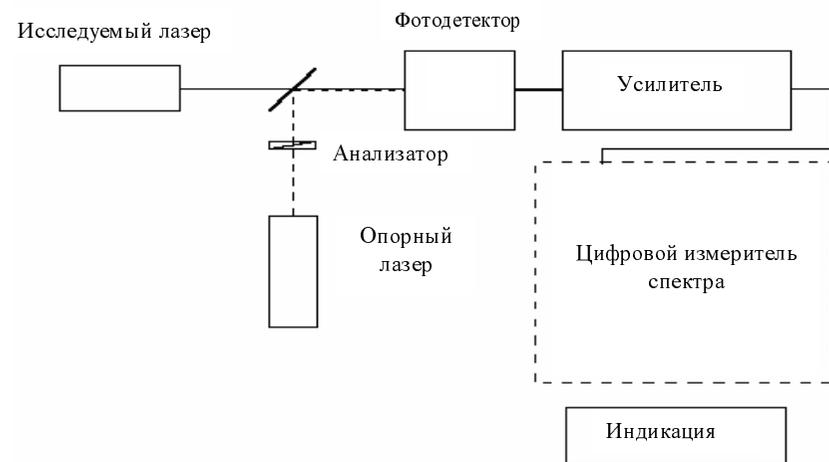


Рис. 1. Структурная схема установки измерения длины волны лазерного излучения

до 1 А/Вт в полосе частот до 1 ГГц и реализовать логарифмическую зависимость коэффициента усиления фотоприемного блока от мощности входного сигнала.

Для получения достаточного значения выходного сигнала фотодетектора $W_{пр}$ в экспериментальной установке выполнены жесткие требования по пространственному согласованию волновых фронтов сигнальной и гетеродинной оптических волн. Это вызвано тем, что длина световой волны значительно меньше размеров фоточувствительной области приемника, на которой осуществляется фотосмещение. Угол наклона фронта одной волны по отношению к другой не должен превышать $\lambda/4d$, где d – диаметр фоточувствительной площадки детектора. Для поддержания амплитуды выходного сигнала $W_{пр}$ вблизи максимума разъюстировка пучков должна быть не более 10^{-3} рад для длины волны лазерного излучения $\lambda = 0.63$ мкм.

Для повышения отношения сигнал/шум на выходе фотодетектора векторы поляризации сигнальной и гетеродинной волн должны быть параллельны [1]. Отклонение угла поляризации компенсировалось соответствующим изменением поляризации сигнального лазера относительно поляризации гетеродина.

Оптическая схема установки была реализована так, что были минимизированы оптические воздействия исследуемого лазера и лазера-гетеродина друг на друга через отражения оптического излучения от конструкций резонаторов и оптических элементов.

В качестве лазера-гетеродина использовался лазер ЛГН–303 со стабилизацией длины волны излучения, которая составляла $\lambda_{оп} = 0.63$ мкм, относительная нестабильность частоты генерации лазера не превышала 10^{-9} , ширина линии генерации 1 Гц. Лазер генерировал две моды с межмодовой частотой 635 МГц. Двухмодовый режим работы лазера-гетеродина использовался для оценки разрешения измерительной системы. При проведении измерений длины волны исследуемых лазеров одна мода лазера-гетеродина пространственно фильтровалась.

Для измерения частоты генерации, кратковременной и долговременной относительной нестабильности, спектра генерации использовался метод, состоящий в измерении значения $W_{пр}$ электронно-счетным частотомером ЧЗ–4А с блоком делителя частоты ЯЗЧ–51 и временах усреднения 0.1 с, 1 с, обработке полученных значений, построение гистограмм распределения и расчета параметров (среднее значение, ширина спектра генерации, относительная нестабильность). При измерениях флуктуаций за время 10^{-2} – 10^{-3} с разрешение системы уменьшалось и проведение ис-

следований параметров частоты лазерного излучения, особенно структуры флуктуаций частоты лазеров, становилось затруднительным.

Оценка точностных параметров разработанной установки проводилась с использованием опорного высокостабильного лазера ЛГН-303. Для данных целей использовался двухмодовый режим работы ЛГН-303 и осуществлялась сравнительная оценка характеристик межмодовой частоты данного лазера с паспортными данными ($\Delta\nu = 685450$ кГц, относительная нестабильность частоты 10^{-9} , ширина линии генерации не более 1 Гц). Исследовались параметры межмодовой частоты опорного лазера при временах усреднения 0.1 с, 1 с и временах измерения 15 и 30 мин. Экспериментальные результаты представлены на гистограмме распределения межмодовой частоты ЛГН-303 (рис. 2). Исследования проводились в режиме стабилизации частоты излучения ЛГН-303. Полученные среднее значение межмодовой частоты (685450100 Гц) лазера ЛГН-303 и относительной нестабильности частоты ($7 \cdot 10^{-10}$ и $2 \cdot 10^{-9}$ за время измерения 15 и 30 мин. соответственно после прогрева лазера) соответствуют паспортным значениям. Среднее значение межмодовой частоты слабо зависит от времени измерения.

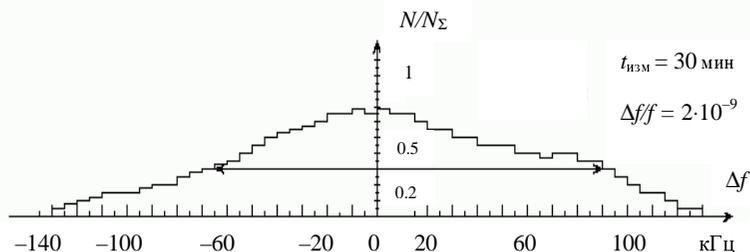


Рис. 2. Гистограмма распределения нестабильности межмодовой частоты лазера ЛГН-303

На разработанной экспериментальной установке исследовались следующие параметры излучения гелиево-неоновых лазеров ЛГ-78 и ЛГ-208: время установления стационарного режима, среднее значение частоты излучения лазера, относительная нестабильность частоты генерации. Измерение времени установления стационарного режима генерации проводилось с использованием анализатора спектра СК4-61 с частотным разрешением $\Delta f = 100$ кГц. Использование анализатора спектра обусловлено тем, что исследуемые лазеры начинают работать в много-

модовом режиме. В результате гетеродинирования в выходном сигнале фотодетектора присутствуют разностные частоты между всеми модами измеряемого и опорного генераторов. В таком режиме проведение измерений с использованием цифрового измерителя частоты ЧЗ-34А затруднительно (большая ошибка измерения частоты).

Анализ режима установления частоты генерации лазеров ЛГ-78, ЛГ-208 показывает, что лазеры начинают работать в многомодовом режиме (2-3 моды). По мере прогрева лазера часть мод генерации исчезает и в установившемся режиме генерируется только одна из них. Время установления одномодового режима для ЛГ-78 составляет 25 мин, для ЛГ-208 – 30 мин после начала работы.

Результаты измерения среднего значения частоты, относительной нестабильности частоты генерации лазеров ЛГ-78, ЛГ-208 представлены на гистограмме рис. 3.

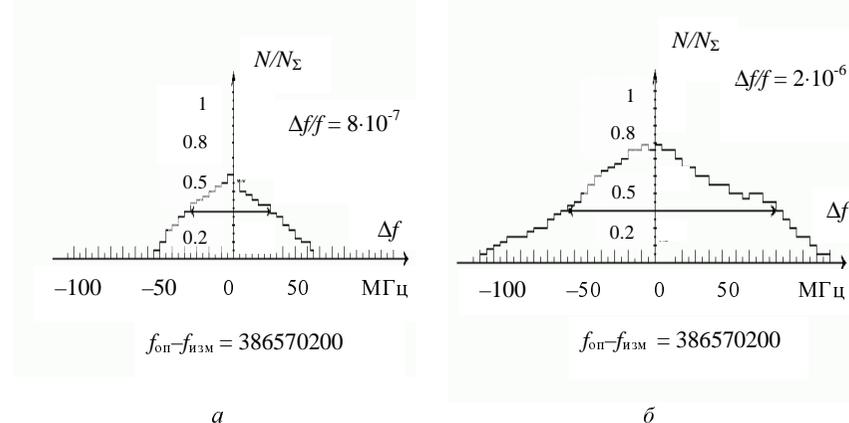


Рис. 3. Гистограмма распределения частоты генерации ЛГ-78 за время наблюдения: 15 (а), 30 мин (б)

Среднее значение частоты генерации лазера ЛГ-78 отличается от частоты генерации лазера ЛГН-303 на 386570200 Гц и практически не зависит от времени измерения после установления стационарного режима измеряемого лазера. Величина относительной нестабильности ЛГ-78 составляет $8 \cdot 10^{-7}$ за время измерения 15 мин (рис. 3 а) и $2 \cdot 10^{-6}$ за 30 мин (рис. 3 б) и в дальнейшем практически не зависит от времени измерения.

Для лазера ЛГ-208 отклонение средней частоты генерации от частоты опорного лазера составило 425678400 Гц при относительной нестабиль-

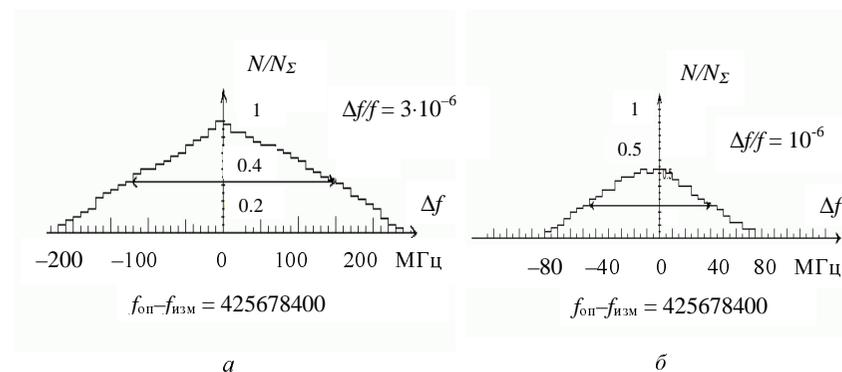


Рис. 4. Гистограмма распределения частоты генерации ЛГ–208 за время наблюдения: 30 (а), 15 мин (б)

ности 10^{-6} за время измерения 15 мин (рис. 4 б) и $3 \cdot 10^{-6}$ за 30 мин (рис. 4 а) и также далее не зависит от времени измерения.

Различия в значениях отклонения средней частоты генерации для ЛГ–78 и ЛГ–208 от опорной частоты связаны с изотопическим составом активных сред лазеров. Величины относительной нестабильности исследуемых лазеров обусловлены их конструктивными особенностями и временем прогрева элементов резонатора.

Таким образом, проведенные эксперименты подтвердили перспективность использования метода фотогетеродинамирования для исследования флуктуаций He–Ne лазеров, отличающихся по частоте от опорного излучения не более чем на 1 ГГц. Представленная установка может служить основой для создания метрологического стенда для аттестации спектральных характеристик узкополосных газовых лазеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Моршнев С.К., Францесон А.В. Когерентная волоконно-оптическая связь // Квантовая электроника, 1985. Т. 12, № 9. С. 1786–1806
2. Чубаров С. И., Гриневич Д. И. Анализатор длины волны лазерного излучения // Квантовая электроника. Материалы IV международной научно-технической конференции. Минск, 18–21 ноября 2002. С. 135.