

УДК 621.373 : 53

## ИЗМЕРЕНИЯ КРАТКОВРЕМЕННОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ ЛАЗЕРОВ С ПОМОЩЬЮ БОЛЬШИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ

М. Н. Дубров

Исследуется стабильность интерференционной картины в несимметричных интерферометрах Майкельсона с длиной большого плеча  $\sim 0.5$  км. Флуктуации интерференционных полос в диапазоне частот  $0.1-1$  кГц с относительной амплитудой  $6 \cdot 10^{-11} - 2 \cdot 10^{-10}$  связываются с кратковременной нестабильностью частоты излучения применявшихся лазеров. Нестабильность оптической длины лучевой линии, которая использовалась в качестве плеч интерферометров, в указанном диапазоне частот оценивается величиной  $\leq 10^{-11}$  отн. ед.

1. При создании оптических стандартов частоты, а также лазеров для интерференционных измерений важной характеристикой лазерного излучения является кратковременная стабильность частоты. Широко используемый гетеродинный метод измерения взаимной нестабильности частоты двух лазеров обладает высокой чувствительностью и является до сих пор единственным при длительных измерениях (10 с и более).

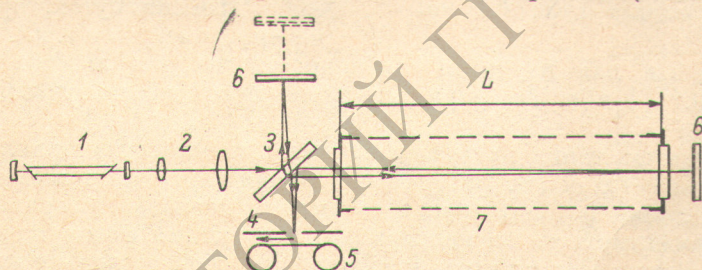


Рис. 1. Схема интерферометра.

1 — лазер, 2 — согласующий телескоп, 3 — светоделительная пластинка, 4 — экран со щелью, 5 — записывающее устройство, 6 — отражатель, 7 — отрезок лучевода длиной  $L$ .

Для регистрации быстрых ( $\leq 0.1$  с) флуктуаций частоты этот способ малоэффективен и не позволяет подробно изучить механизмы возникновения нестабильностей.

Ниже описан способ измерения флуктуаций частоты одного лазера при помощи интерферометров с разностью хода до 1 км [1]. Схема неравноплечего интерферометра Майкельсона приведена на рис. 1. Длина короткого плеча  $10-20$  см, а в качестве большого плеча  $L$  используются отрезки подземной лучевой линии [2] длиной от 10 до 500 м. Эксперименты проводились как с нестабилизированными, так и со стабилизированными по частоте He-Ne лазерами на длине волны  $\lambda=0.63$  мкм; ширина светового пучка в лучевом уровне  $6r$ , около 18 мм, что позволяло легко осуществлять пространственную развязку лазера и интерферометра.

Регистрируемой величиной является движение интерференционной картины, которое несет информацию как об изменении оптической длины большого плеча, так и о колебаниях длины волны лазера во времени:



увеличение длины интерферометра эквивалентно уменьшению длины волны света.<sup>1</sup> Равным относительным изменениям двух указанных величин соответствует одинаковое смещение полос

$$\delta\varphi = \frac{2\pi 2L}{\lambda} \frac{\delta L}{L} - \frac{2\pi 2L}{\lambda} \frac{\delta\lambda}{\lambda}, \quad (1)$$

где  $\delta\varphi$  — смещение картины в радианах.

2. Оценим чувствительность интерференционного метода. Если длина большого плеча  $L=500$  м и  $\lambda=0.63$  мкм, то сдвигу картины на одну полосу соответствует относительное изменение частоты лазера

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = -\frac{\delta\lambda}{\lambda} \approx 6 \cdot 10^{-10} \text{ отн. ед.} \quad (2)$$

Как видно из (1), измерения  $\delta\nu/\nu$  можно производить при условии, что относительная нестабильность оптической длины плеча интерферометра

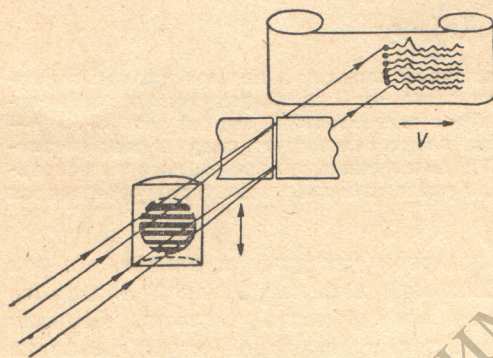


Рис. 2. Схема фотографической регистрации движения интерференционной картины, ширина щели 0,1 мм.

меньше, чем измеряемые флуктуации частоты лазера. Исследования [3] показали, что стабильность герметичного лучевода длиной 500 м в диапазоне частот 0,001—0,1 Гц (за время от 10 с до 20 мин) при диаметре трубопровода 530 мм составляет  $1 \cdot 10^{-10}$ — $2 \cdot 10^{-9}$  в зависимости от сезона. Стабильность интерферометра в диапазоне частот 1—10 Гц определяется промышленным микросейсмическим шумом [4] и для полигонного лучевода изменяется от  $3 \cdot 10^{-10}$  до  $10^{-8}$  в зависимости от условий измерений (времени суток, ориентации интерферометров и т. п.). Наиболее

перспективным для изучения стабильности частоты лазеров является диапазон 0,1—1 кГц, где флуктуации оптической длины лучевода не превышают  $10^{-11}$ .

3. Запись смещения интерференционных полос осуществлялась фотографическим методом [5]. Интерференционная картина с помощью цилиндрической линзы и (или) экрана со щелью, перпендикулярной полосам (рис. 2), проецируется на непрерывно движущийся фотоматериал. Регистрируемая «интерферограмма» представляет собой развертку во времени колебаний интерференционной картины. Для записи использовалась стандартная 35-мм пленка чувствительностью не выше 250 ед. ГОСТ.

Лазеры располагались в подземных прямо-передающих помещениях лучевода. Для предотвращения акустических помех со стороны записывающего устройства последнее и исследуемый лазер размещались в разных помещениях.

4. Некоторые примеры полученных записей приведены на рис. 3. Измерения показали, что величина и характер наблюдаемых кратковременных флуктуаций частоты лазера в значительной степени зависят от его конструкции и наличия системы частотной стабилизации. Для пассивных лазеров (лазеры типа ЛГ-35, ЛГ-56, ЛГ-126) кратковременная нестабильность частоты обычно не превышает  $10^{-10}$  и определяется либо флуктуациями тока разряда, либо механическими вибрациями резонатора и газоразрядной трубки. На записи рис. 3, а видны колебания интерференционной картины с частотами 100 и 300 Гц, т. е. кратными частоте промышленного тока. Эти колебания возникают из-за несовершенства блока

<sup>1</sup> Для наблюдения четкой интерференционной картины при работе лазера в многочастотном режиме необходимо, чтобы  $L=nl$ , где  $l$  — длина резонатора,  $n=1, 2, \dots$



питания лазера, их амплитуда  $< 2 \cdot 10^{-10}$ . Колебания с частотами 700—800 Гц (рис. 3, б) вызваны, вероятно, акустическими эффектами, амплитуда колебаний  $\sim 6 \cdot 10^{-11}$ .

Запись на рис. 3, в демонстрирует взаимную стабильность оптических длин двух отрезков лучевода  $L_1 \approx L_2 = 485 \pm 1$  м, включенных в симметричный (равноплечий) интерферометр Майкельсона; в диапазоне частот 0.1—1 кГц нестабильность не превышает  $10^{-11}$ .

Исследования частотно стабилизированного лазера с внешней зеemannовской неоновой ячейкой показали, что кратковременная нестабильность его частоты порядка  $10^{-8}$  и обусловлена значительными вибрациями на частоте около 1 кГц. Было также обнаружено, что шумы электронной части системы АПЧ, которые присутствуют в сигнале, управляющем пьезо-керамическим преобразователем, вызывают кратковременную нестабильность частоты этого лазера величиной до  $1 \cdot 10^{-8}$  в диапазоне 1—100 Гц. При отключении системы АПЧ и магнитного возбуждения ячейки нестабильность частоты в течение времени 0.1 с и короче находилась на уровне  $10^{-10}$ . Таким образом, метод позволил установить, что кратковременная стабильность частоты данного лазера с примененной системой автоподстройки ухудшается на два порядка по сравнению с пассивным лазером.

5. Полученные результаты свидетельствуют о том, что несимметричный интерферометр Майкельсона с длиной большого плеча 0.5 км и более является довольно эффективным прибором для исследования кратковременной нестабильности частоты лазеров. Кроме протяженного лучевода, в качестве большого плеча интерферометра могут быть использованы многопучковые резонаторы [6], в которых лазерный пучок многократно отражается от двух зеркал, разнесенных на некоторое расстояние друг от друга. Интересной представляется также возможность использования здесь стекловолоконных световодов с малыми потерями. Увеличение эффективной длины плеча до нескольких километров, а также применение электронной системы регистрации позволит повысить чувствительность прибора до  $10^{-12}$ — $10^{-13}$  отн. ед.

#### Литература

- [1] М. Н. Дубров. Радиотехника и электроника, 18, 2480, 1973.
- [2] В. П. Вардья, А. Б. Догадкин, А. А. Дяченко, И. П. Коршунов, Р. Ф. Матвеев, О. Е. Шущпанов. Радиотехника и электроника, 18, 391, 1973.
- [3] М. Н. Дубров. Радиотехника и электроника, 21, 2218, 1976.
- [4] М. Н. Дубров. Изв. АН СССР, Физика Земли, № 5, 90, 1976.
- [5] M. Bertolotti, M. Carnevale, B. Daino, D. Sette. Appl. Opt., 9, 962, 1970.
- [6] D. Gloge, W. H. Steier. BSTJ, 48, 1445, 1969.

Поступило в Редакцию 24 февраля 1977 г.

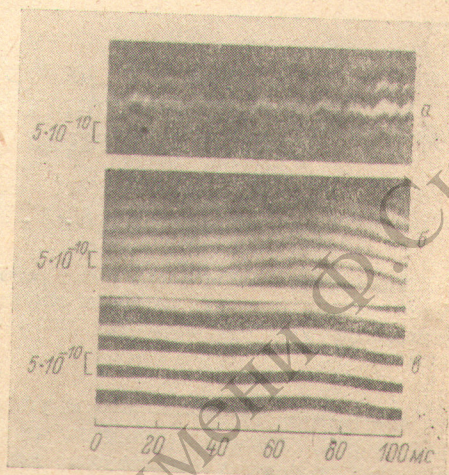


Рис. 3. Интерференционные записи быстрых флуктуаций частоты лазера. а — лазер ЛГ-56,  $L=484$  м; б — лазер ЛГ-35,  $L=485$  м; в — стабильность равноплечевого интерферометра  $L_1 \approx L_2 = 485 \pm 1$  м.