

УДК 621.373.829.038.823

С.П. Борисовский, М.Ю. Керносков, В.А. Степанов, Е.Г. Чуляева
ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ОДНОЧАСТОТНОГО ЛАЗЕРА ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ

Приведены результаты исследования свойств излучения одночастотного лазера повышенной мощности. Указаны основные факторы, влияющие на длину когерентности лазера. Определено влияние теплового расширения кварцевого эталона Фабри-Перо на стабильность мощности лазерного излучения и на длину когерентности. Показано, что малое время когерентности лазерного излучения обусловлено температурными колебаниями длины кварцевого эталона Фабри-Перо.

В настоящее время для создания голографических изображений необходимы лазеры повышенной мощности с высокой степенью когерентности. Высокая когерентность в одночастотном режиме излучения позволяет получать голограммы с большой глубиной поля изображения. Впервые понятие когерентности в оптике было введено для описания экспериментов по дифракции и интерференции света в интерферометрах Юнга и Майкельсона. В этих экспериментах контраст интерференционной картины зависел от спектральных и пространственных характеристик волнового поля, которые тесно связаны с его происхождением, распространением и взаимодействием со средой. Когерентность есть проявление связи между флуктуациями этого поля.

Для описания характеристик взаимной когерентности для двух точек используется формула следующего вида:

$$|v_{12}| = \frac{I_1 + I_2}{2\sqrt{I_1 \cdot I_2}} \cdot V, \quad (1)$$

где V – видность интерференционной картины, определяемая, в свою очередь, выражением:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (2)$$

$I_{1,2}$ – интенсивности интерферирующих лучей; I_{\max} – максимальное значение интенсивности светлой интерференционной полосы; I_{\min} – минимальное значение интенсивности темной интерференционной полосы.

Различают пространственную и временную когерентность лазерного пучка. Пространственная когерентность соответствует случаю взаимодействия световых волн, исходящих из разных точек поперечного сечения пучка и имеющих нулевую разность хода. Временная коге-

рентность характеризуется уходами частоты излучения в процессе генерации.

Когерентность характеризуется длиной когерентности и временем когерентности.

Большое значение имеет метод определения когерентности. Использование интерферометра Майкельсона позволяет определить временную когерентность, что показано в работе [1]. Временная когерентность – это время запаздывания $\tau_{\text{ког}}$, при котором существует контрастная интерференционная картина

$$\gamma(\tau) \geq 0,88, \quad (3)$$

$\gamma(\tau)$ – степень когерентности.

В этом случае длина когерентности

$$l_k = c \cdot \tau_k,$$

где τ_k – время когерентности; c – скорость света.

Таким образом, временная когерентность характеризует взаимную спектральную плотность волн, т.е. возможность получить интерференционную картину при сложении двух источников света. Зависимость γ от разности хода l носит осциллирующий характер. При разности хода, равной нулю, имеем наиболее контрастную интерференционную картину.

Целью настоящей работы явилось исследование когерентности и стабильности интенсивности излучения одночастотного лазера повышенной мощности.

Для обеспечения генерации лазера на одной частоте наиболее эффективны методы внутренней селекции мод резонатора [2]. Это объясняется тем, что во многих лазерах в результате конкуренции мод при подавлении в резонаторе ряда мод остальным модам, на которых происходит генерация, передается большая энергия. Кроме того, с помощью устройств, помещаемых внутрь резонатора, можно добиться более высокой степени селекции, так как для того, чтобы подавить

нежелательную моду, достаточно лишь увеличить её потери до уровня, превышающего усиление.

В свою очередь, селекция с помощью внутриврезонаторного интерферометра Фабри-Перо является наиболее эффективным методом внутренней селекции. Этот метод известен давно и нашел применение во многих типах лазеров [3-6]. Он состоит в том, что внутри резонатора под небольшим углом к оси помещается интерферометр Фабри-Перо (ИФП), что позволяет получить высокий коэффициент отражения в узкой спектральной полосе (во много раз уже линии усиления активной среды).

На рис. 1 схематически представлен лазер с длиной резонатора 1.8 м и диаметром активного элемента 2.9 мм, содержащий внутри резонатора ИФП.

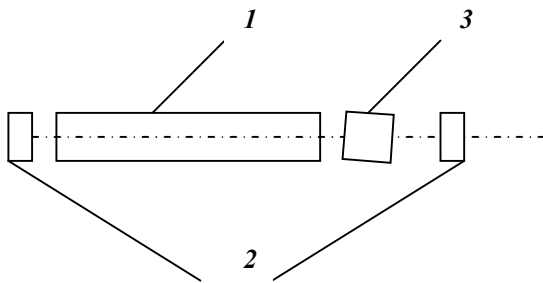


Рис. 1. Схема одночастотного газоразрядного гелий-неонового лазера повышенной мощности:
1 – активный элемент газоразрядного гелий-неонового лазера, 2 – зеркала резонатора, 3 – ИФП

Важным элементом резонатора лазера является интерферометр Фабри-Перо, который обеспечивает одночастотный режим генерации при минимально разрешимой полосе $\Delta\nu_{\min} \leq 75 \text{ МГц}$ (для рассматриваемого гелий-неонового лазера с длиной резонатора 1.8 м).

Коэффициент отражения сложного зеркала, состоящего из интерферометра и расположенного за ним выходного зеркала, довольно хорошо соответствует кривой пропускания обычного резонатора Фабри-Перо, ввиду чего можно получить узкую спектральную область с высоким коэффициентом отражения. За счет «ухода» части излучения вследствие наклона ИФП выбранная мода будет обладать потерями. Однако во многих случаях эти потери недостаточно велики для получения одночастотного режима.

Так как потери на «уход» возрастают с увеличением коэффициента отражения поверхности эталона, данный метод применяется, в первую очередь, в лазерах со значительной конкурентной мод, где для получения одночастотного излу-

чения достаточно установить низкодобротный эталон.

Резонатор лазера, в свою очередь, представляет собой ИФП с коэффициентом передачи мощности

$$K(r) = 1 \cdot (1 - r - \alpha) \cdot [(1 - r)^2 + 4\pi \times \times [\sin(\cos(0.05 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 1.58 \cdot L \cdot n))]^2]^{-1}, \quad (4)$$

где: L – длина резонатора; r – эффективный коэффициент отражения резонатора; α – потери резонатора [2,3].

Интенсивность лазерного излучения определяется зависимостью от частоты, умноженной на выражение (4). Подставляя значения потерь резонатора, длины резонатора, коэффициента отражения зеркал, коэффициента преломления в кварце [4], получаем:

$$I(\nu) = e^{-\left(\frac{\nu}{700}\right)^2} \cdot 1 \cdot [(1 - 0.05)^2 + + 300 \cdot (\sin(0.035 \cdot \nu))^2]^{-1}, \quad (5)$$

Выражение описывает распределение интенсивности лазерного излучения по частоте и резонансы в спектре излучения. Это полученная расчетным путем зависимость интенсивности лазерного излучения от расстройки резонатора для рассматриваемого лазера типа ЛГН-220.

Как видно на рис. 2, на уровне половинной интенсивности в спектре одномодового лазера рассматриваемой конструкции наблюдается примерно 20 частот.

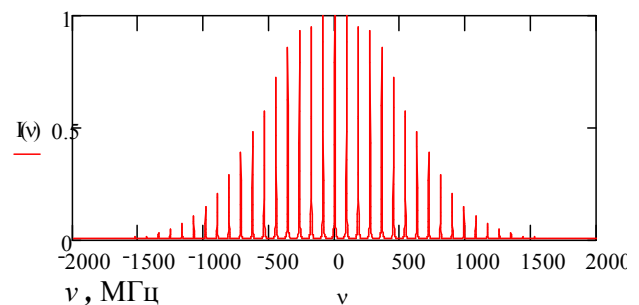


Рис 2. Зависимость интенсивности лазерного излучения от расстройки резонатора

Согласно [3] эффективный коэффициент отражения R_2^* системы ИФП – сферическое зеркало определяется формулой

$$R_2^* = K \cdot R_2, \quad (6)$$

где R_2 – коэффициент отражения сферического зеркала;

$$K = \left[\left(1 + \frac{L \cdot R_u}{(1 - R_u)^2} \times \times \sin^2 \left(\frac{2\pi \cdot \nu \cdot L \cdot n}{c} \cos \alpha \right) \right)^2 \right]^{-1}, \quad (7)$$

где ν – частота излучения; c – скорость света; L – длина резонатора; R_u – коэффициент отражения граней интерферометра; α – угол между осью ИФП и осью пучка излучения в ИФП; n – показатель преломления материала интерферометра (кварца). Потери излучения за один проход резонатора определялись по соотношению

$$K_n = -0.5 \ln(R_1 R_2^*), \quad (8)$$

где R_1 – коэффициент отражения плоского зеркала.

Зависимость K_n от R_2^* при $R_1=0.995$, $R_2=0.97$ приведена на рис. 3. Эта зависимость позволяет определить для заданного коэффициента усиления K_y значение R_2^* , при котором генерации не будет. Коэффициент K_y принимался равным 10% за один проход резонатора.

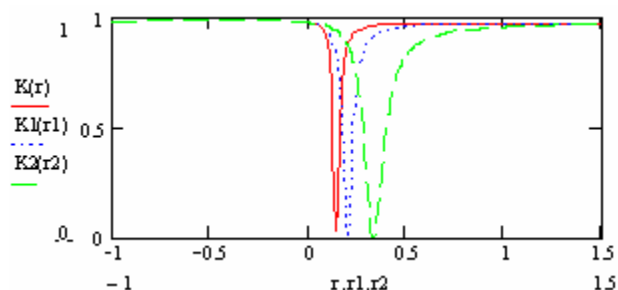


Рис. 3. Зависимость коэффициента потерь ИФП от коэффициента отражения граней интерферометра:
 — коэффициент отражения 0.07;
 ... коэффициент отражения 0.05;
 --- коэффициент отражения 0.03

Отражение граней для кварцевого эталона полагалось равным 4 %.

Кроме того, определялось R_{sp} (коэффициента отражения граней интерферометра, при котором происходит селекция) и расстояние между минимумами потерь от оптической длины эталона. Обнаружено, что с уменьшением $L_{ИФП}$ значение R_{sp} возрастает. Зависимость $\Delta\nu(L_{ИФП})$ позволяет определить, что при $L_{ИФП}=1..5$ см второй минимум потерь находится далеко за пределами контура усиления, (рис. 4, при температуре газа около 50 °С).

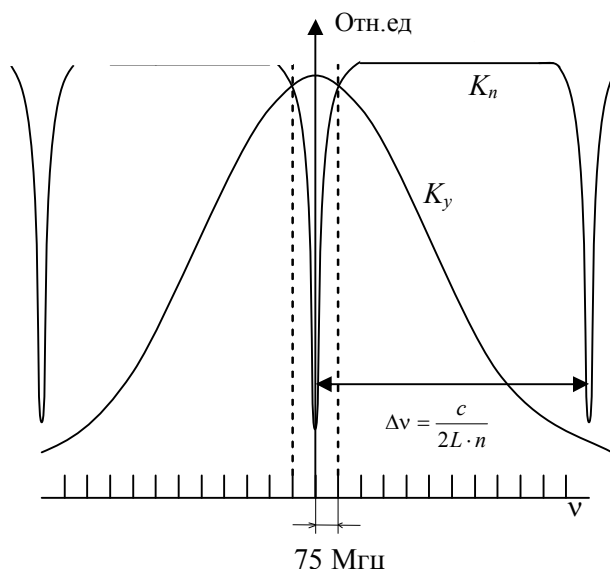


Рис. 4. Иллюстрация подавления аксиальных типов колебаний с помощью эталона ИФП:
 K_n – коэффициент потерь, вносимых ИФП,
 K_y – коэффициент усиления активной среды лазера

При внесении ИФП в резонатор возможны дополнительные потери излучения, обусловленные поглощением в материале ИФП, наклоном и непараллельностью граней ИФП.

Для оценки термостабильности были использованы данные [7] о температурных коэффициентах линейного расширения α и показателя преломления β кварца. При изменении температуры на Δt меняется оптическая длина ИФП L_n .

$$\Delta L_n = L \cdot n \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \Delta t$$

Для оценки термостабильности ИФП примем для кварца $\alpha=5 \cdot 10^{-7}$; $\beta=1 \cdot 10^{-4}$; $\Delta T=0.1^\circ\text{C}$; $n=1.48$; $L_{ИФП}=0.05$ м. Вычислим ΔL_n и $\Delta\nu$:

$$\Delta(L_n) = 0.05 \cdot 1.48 \cdot (5 \cdot 10^{-7} + 1 \cdot 10^{-4} \cdot 0.1) = 6.25 \cdot 10^{-7}$$

$$\Delta\nu = \frac{\nu \cdot \Delta L}{n \cdot L} = \frac{5 \cdot 10^{14} \cdot 6.25 \cdot 10^{-7}}{1.5 \cdot 10^{-2}} = 6.25 \cdot 10^8 = 625 \text{ МГц}$$

Таким образом, изменение температуры на 0.1 °С приводит к сдвигу частоты на 625 МГц. В этом случае происходят «перескоки» частоты с одного резонанса ИФП на другой.

Изменение мощности излучения от времени при самопрогреве резонатора с включенным активным элементом проиллюстрировано рис. 5. Ток разряда активного элемента составлял 36 мА; напряжение горения – 3200 В. Активный элемент представлял собой двухплечевую конструкцию – один катод и два анода. Измерения нестабильности мощности проводились с помощью фотоприемника и самописца.

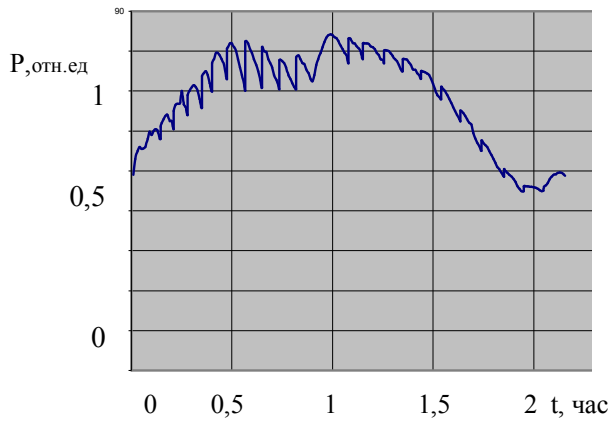


Рис. 5. Изменение мощности лазерного излучения одночастотного лазера в режиме самопрогрева

Из рисунка видно, что в первые минуты прогрева происходят «скачки» с одной частоты на другую, что связано с изменением длины интерферометра. Наблюдаемая на рис.5 структура представляет собой поочерёдное выделение продольных мод в пределах линии усиления за счёт тепловой перестройки ИФП.

Поскольку основное назначение прибора – голография, где необходимо знать длину когерентности, нами были произведены измерения длины когерентности [7;8] по схеме, представленной на рис. 6.

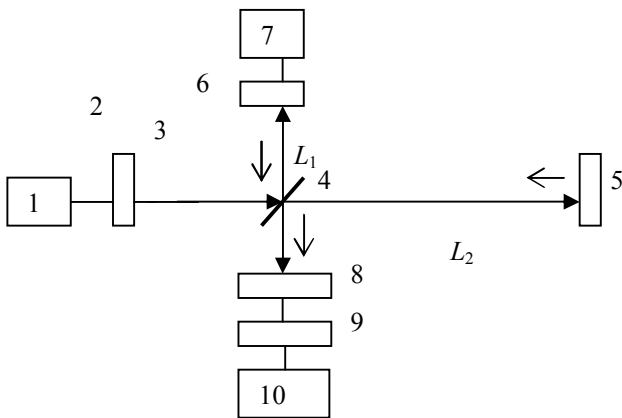


Рис. 6. Схема измерения длины когерентности: 1 – лазер ЛГН-220; 2 – поляризатор; 3 – делительное зеркало (50 %); 4 – зеркало $R=\infty$; 5 – зеркало $R=\infty$; 6 – зеркало с пьезокорректором; 7 – лабораторный автотрансформатор; 8 – диафрагма; 9 – фотодиод ФД-24К; 10 – осциллограф

Излучение лазера направлялось на 50 % полупрозрачное зеркало 4, где расщеплялось на 2 луча. Зеркала 6 и 5 образуют интерферометр Майкельсона, где L_1 – опорное плечо, а L_2 – измерительное. Излучение, отраженное от зеркала 6 и зеркала 5, формирует на полупрозрачной

пластине интерференционную картину, которая регистрируется фотоприемником 9. Расстояние L_2 меняется. В соответствии с формулой (1) определяется качество интерференционной картины.

В результате измерений получена зависимость видности интерференционной картины от разности хода интерферирующих пучков рис. 7. За длину когерентности принимают разность хода, при котором видность снижается до уровня 0.5 от максимального значения.

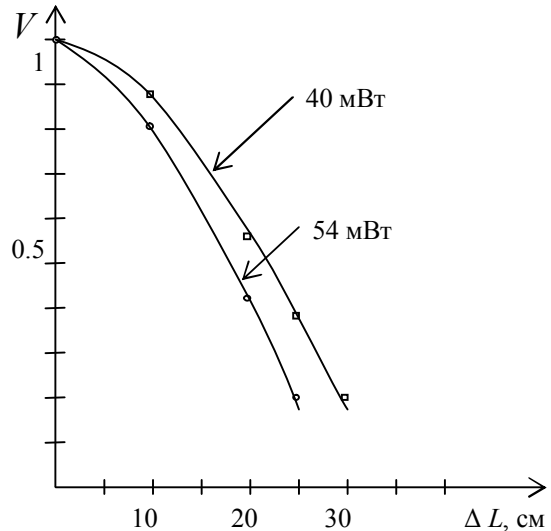


Рис. 7. Зависимость видности интерференционной картины от разности хода интерферирующих пучков при разных уровнях мощности

Таким образом, проведенные исследования позволили определить основные характеристики одночастотного лазера повышенной мощности, разработанного на базе лазера ЛГН-220.

Измеренное значение длины когерентности составило ≥ 270 см (время когерентности ≥ 2 мин).

Мощность лазерного излучения 40 мВт.

Стабильность мощности составляет около 5 % после двухчасового прогрева.

Для увеличения стабильности одночастотного режима и мощности излучения лазера необходимо обеспечить термостатирование ИФП с точностью не менее $0,01^\circ\text{C}$.

Библиографический список

1. Мирзаев А. Т., Рахвалов В. В., Степанов В. А. Когерентность излучения лазеров. //Обзоры по электронной технике. Серия 4. «Электровакuumные и газоразрядные приборы». Вып. 2.: М.. «ЦНИИ Электроника», 1978.
2. Иценко Е.Ф. Климков Ю.М. Оптические квантовые генераторы. Изд-во «Советское радио», 1968.

3. *Смит*. Селекция мод в лазерах // ТИЭР. – 1972. – Т 60, №4. – С.106

4. *Hercher H.* Tunable single mode operation of gas lasers using intracavity tilted etalons // Appl. Opt.- 1969. – Vol.8. – P. 1103.

5. *Smith P. W.* A waveguide gas lasers // Appl. Phys. Lett. – 1971. – Vol.19. – 132.

6. *Lin L. H.* Experimental techniques in making multicolor white lights reconstructed holograms // Appl. Opt. – 1967. – Vol.6. P.1255.

7. Стекло кварцевое оптическое. Технические условия: ГОСТ 15130-79.

8. *Хирд Д. Г.* Измерения лазерных параметров. – М.: Мир. – 1970. – 539 с.