

Член-корреспондент АН СССР Р. И. СОЛОУХИН, Ю. А. ЯКОБИ

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛАЗЕР-ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ МАЙКЕЛЬСОНА С ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ДОБРОТНОСТИ

Применяя интерферометр типа Майкельсона в качестве составной части резонатора газового лазера (¹⁻³) и переходя в режим фазовой модуляции добротности (^{2, 3}), можно обеспечить высокую чувствительность интерферометрического метода измерения плотности электронов в плазме. В сильно несимметричной системе лишь около 1% мощности пучка ответвляется в одно из плеч интерферометра, причем малому изменению оптической длины этого плеча, слабо связанного с резонатором, соответствует значительное изменение выходной мощности системы и плотности излучения в резонаторе. В зависимости от скорости изменения фазы в интерферометре,

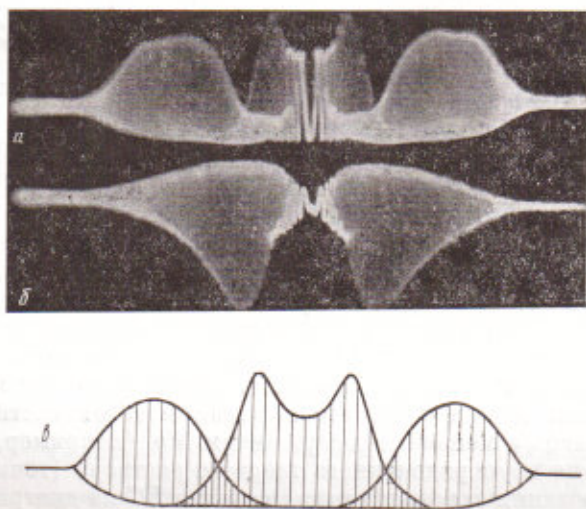


Рис. 1. Фазовая модуляция излучения лазер-интерферометра Майкельсона на CO_2 . а — осциллограмма, зарегистрированная детектором 1 (выходной пучок интерферометра); б — осциллограмма, зарегистрированная детектором 2 в слабом пучке, отраженном от окна Брюстера (плотность энергии в резонаторе); в — изменение фазы импульсов в пучке на выходе интерферометра. Длительность развертки 7 мсек.

которое достигается, например, путем вращения прозрачной плоскопараллельной пластинки в плече, слабо связанном с резонатором, и с учетом конечного времени накопления энергии в резонаторе, можно получить различные фазовые соотношения между «модулирующим» процессом, плотностью излучения в резонаторе и выходной мощностью лазер-интерферометра. В работе описаны некоторые особенности и анализ работы лазер-интерферометра в таком режиме.

Использовалась газоразрядная трубка $\text{CO}_2 - \text{N}_2 - \text{He}$, разделительная пластинка из каменной соли (коэффициент отражения на длине волны $10,6 \mu$ равен 1%), детекторы излучения из германия, легированного золотом. При

вращении пластинки из фтористого бария в плече, слабо связанном с резонатором, на выходе интерферометра (детектор 1) возникает четкая последовательность световых импульсов, расстояние между которыми соответствует изменению фазы на 2π в плече интерферометра (рис. 1а). Об изменении плотности энергии в резонаторе можно судить по вариации интенсивности слабого пучка, отраженного от окна Брюстера газоразрядной трубки ОКГ (детектор 2). Характер получаемых осциллограмм показан на рис. 2.

На высоких частотах модуляции (края осциллограмм рис. 1, соответствующих полному обороту пластинки) оба детектора регистрируют серию импульсов, совпадающих по фазе. При малых частотах (центр осциллограмм на рис. 1), наоборот, серии сигналов двух детекторов сдвинуты по фазе на π . В области «промежуточных» частот детектор 1 регистрирует две взаимно перекрывающиеся системы импульсов с суммарной частотой, равной удвоенной частоте фазовой модуляции.

Для анализа переходных процессов и релаксации плотности излучения R в резонаторе в условиях меняющихся во времени потерь рассмотрим систему простейших кинетических уравнений для заселенностей лазерных уровней (N_1 и N_2):

$$\begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= W_2 N_2 - W_1 N_1 + \frac{B}{\Delta\nu} (N_2 - N_1) R, \\ \frac{dN_2}{dt} &= k_2 - W_2 N_2 - \frac{B}{\Delta\nu} (N_2 - N_1) R, \\ \frac{dR}{dt} &= R \left[\hbar\nu \frac{B}{\Delta\nu} (N_2 - N_1) - L \frac{c}{d} \right], \end{aligned} \quad (1)$$

где W_1 и W_2 — вероятности дезактивирующих столкновений с другими молекулами соответственно для нижнего и верхнего уровней, k_2 — скорость возбуждения верхнего уровня, B — коэффициент Эйнштейна для индуцированного излучения между уровнями 2 и 1, $\Delta\nu$ — ширина спектральной линии, L — относительные потери на один проход резонатора, c — скорость света, d — длина резонатора.

В стационарном случае

$$R = \hbar\nu \frac{k_2 d}{Lc} \left(1 - \frac{W_2}{W_1} \right) - \frac{W_2 \Delta\nu}{B}, \quad (2)$$

если потери L меньше критических. Выражение (2) применимо также в случае достаточно медленного «адиабатического» изменения состояния системы.

Выходную мощность лазер-интерферометра будем описывать с помощью некоторого коэффициента связи T , характеризующего как уровень непрерывных потерь системы, так и вариации выходного пучка. Пусть

$$T = \frac{1}{2}(1 + \tau \sin \omega t), \quad L = \frac{1}{2}(1 + l \sin \omega t).$$

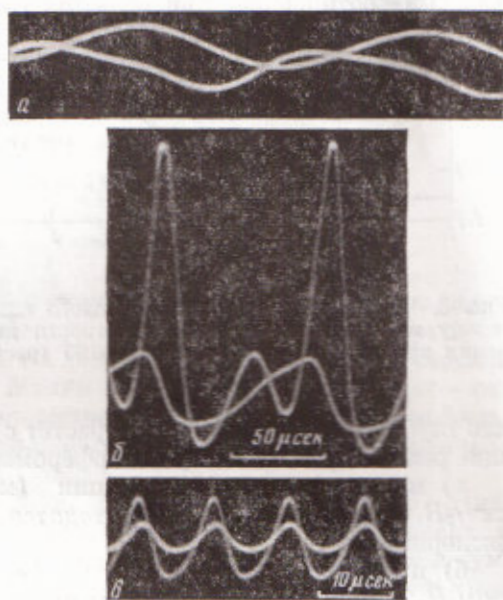


Рис. 2. Фазовая модуляция выходной мощности и плотности излучения в резонаторе в различных частотных диапазонах

Тогда при $l \ll 1$ из (2) можно получить:

$$R \simeq R_0(1 + \rho \sin \omega t),$$

т. е. при небольшой глубине модуляции потерь и плотности излучения в резонаторе (малые частоты) R и L сдвинуты по фазе на π . Для выяснения фазовых соотношений при больших глубинах модуляции и при больших

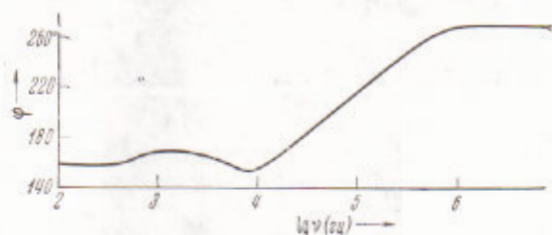


Рис. 3. Частотная зависимость фазового сдвига между максимумами потерь и плотности излучения при глубине модуляции $l = 0,95$ (расчетные данные)

частотах система уравнений (1) была решена численно на ЭВМ при совокупности параметров, характерных для CO_2 -лазера (¹). На рис. 3 представлена частотная зависимость фазового сдвига между максимумами R и L при $l = 0,95$. Оказалось, что вплоть до частот порядка 100 кГц фазовый сдвиг изменяется мало и остается в пределах $\frac{5}{6}\pi < \phi < \frac{7}{6}\pi$.

Таким образом, учитывая,

что глубина модуляции быстро растет с частотой, можно выделить следующие режимы работы лазер-интерферометра:

а) малые частоты модуляции (менее 10 кГц), $\rho \ll 1$, $P = RT \simeq \frac{1}{2}R_0(1 + \tau \sin \omega t)$, P и R находятся в противофазе, что соответствует эксперименту (рис. 2а);

б) промежуточные частоты (~ 10 кГц), $\rho \sim 1$, $\tau \sim 1$, $P \simeq \frac{1}{2}R_0(1 - \sin^2 \omega t)$, в выходном пучке серия импульсов удвоенной частоты 2ω , ср. рис. 2б;

в) при частотах порядка 100 кГц $\rho \gg 1$ и $P \simeq \frac{1}{2}R_0(1 - \rho \sin \omega t)$, т. е. P и R находятся в фазе (рис. 2в).

Основные особенности лазер-интерферометра на CO_2 — полная модуляция плотности излучения в резонаторе, осуществляемая путем изменения фазы светового потока, составляющего всего лишь 1% энергии лазера, и фазовый сдвиг между R и L — позволяют рассматривать эту систему как своеобразный оптический «триод», в котором роль «управляющей сетки» выполняет плечо интерферометра, слабо связанное с основным резонатором. Такая система интересна, например, для определения концентрации электронов в плазме. Однако при регистрации быстро протекающих процессов ($\lesssim 10^{-4}$ сек.) необходимо учитывать те особенности выхода излучения из системы, которые были рассмотрены выше и могут быть характерны также и для других систем трехзеркальных лазер-интерферометров. В этой связи требуют дополнительного анализа данные работы (²), полученные путем регистрации в канале с переменными потерями.

Авторы признательны П. А. Сковородко за выполнение расчетов на ЭВМ.

Институт ядерной физики
Сибирского отделения Академии наук СССР
Новосибирск

Поступило
22 X 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Ю. Д. Коломников, В. Н. Лисицын, В. П. Чеботарев, Оптика и спектроскопия, 22, 828 (1967).
- ² W. J. Witteman, Appl. Phys. Lett., 10, 347 (1967).
- ³ Р. И. Солоухин, Ю. А. Якоби, Оптика и спектроскопия, 29, № 3 (1970).
- ⁴ Б. Ф. Гордиев, Н. Н. Соболев, Л. А. Шеленин, ЖЭТФ, 53, 1822 (1967).