

Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 4 — 1971

УДК 621.378.3

Ф. А. КОРОЛЕВ, П. В. КОРОЛЕНКО, А. И. ОДИНЦОВ,
Т. В. ФЕОФИЛАКТОВА

СКАНИРУЮЩИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ФАБРИ — ПЕРО С АКТИВНЫМ ВЕЩЕСТВОМ ВНУТРИ РЕЗОНАТОРА

Проведен расчет коэффициента передачи и разрешающей способности интерферометра Фабри — Перо с активным веществом внутри резонатора. Полученные теоретические зависимости сравниваются с экспериментальными результатами.

В последнее время для исследования спектрального состава лазерного излучения широкое применение находят сканирующие интерферометры Фабри—Перо. Предел разрешения таких интерферометров при высоком коэффициенте отражения зеркал ($\sim 99\%$) достигает 1 мк.

Добротность и разрешающая сила интерферометра может быть значительно повышена, если частично скомпенсировать его потери, помещая внутри резонатора усиливающую среду. При этом одновременно достигается увеличение коэффициента передачи (пропускания) прибора. Подобный «активный» интерферометр представляет собой не что иное, как регенеративный оптический квантовый усилитель. Характеристики подобных систем теоретически рассмотрены в работах [1—5]. Однако в них не учитывались некоторые факторы, играющие заметную роль в реальных интерферометрах. Так, в [2, 3] не учитывалось насыщение активной среды интерферометра, а в [1, 3] допускались пренебрежения диссипативными потерями резонатора. Во всех расчетах игнорировалась пространственная структура типов колебаний резонатора. Указанные приближения в теоретических исследованиях затрудняют количественное сравнение их результатов с данными немногочисленных экспериментальных работ [1, 6, 7].

В настоящей работе приводится уточненный расчет коэффициента передачи и разрешающей способности активного интерферометра с учетом как диссипативных потерь резонатора и насыщения активной среды, так и пространственной неоднородности светового поля. Полученные теоретические зависимости сравниваются с экспериментальными характеристиками интерферометра с неон-гелиевой активной средой ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$).

Коэффициент передачи активного интерферометра [2, 3] определяется выражением

$$G_v = \frac{W_{\text{ВЫХ}}}{W_{\text{ВХ}}} = \frac{t_1 t_2 e^{kl-a}}{1 - 2\sqrt{R_1 R_2} e^{kl-a} \cos \frac{4\pi L\nu}{c} + R_1 R_2 e^{2(kl-a)}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{ВХ}}$, $W_{\text{ВЫХ}}$ — мощности светового пучка на входе и выходе интерферометра; t_1 , t_2 и R_1 , R_2 — соответственно коэффициенты пропускания и отражения входного и выходного зеркала; k — насыщенный коэффициент усиления активной среды; L — оптическая длина резонатора; l — длина активной среды; a — коэффициент диссипативных потерь внутри резонатора; ν — частота и c — скорость света. Величина G является функцией мощности входного сигнала.

При наличии резонанса коэффициент передачи интерферометра принимает вид

$$G_0 = \frac{t_1 t_2 e^{kl-a}}{(1 - \sqrt{R_1 R_2} e^{kl-a})^2}. \quad (2)$$

Из формулы (1) вытекает следующее выражение для ширины полосы пропускания интерферометра, определяющей его предел разрешения:

$$\delta\nu = \frac{c}{2\pi L} \sqrt{\frac{t_1 t_2}{G_0 \sqrt{R_1 R_2}}}. \quad (3)$$

Разрешающая сила и коэффициент передачи активного интерферометра достигают своих максимальных значений, если интерферометр находится на пороге самовозбуждения, т. е. выполняется соотношение:

$$\sqrt{R_1 R_2} = e^{-k_0 l + a}, \quad (4)$$

где k_0 — ненасыщенный коэффициент усиления активной среды.

Указанный режим работы активного интерферометра на пороге самовозбуждения является наиболее выгодным в большинстве практических задач¹, поэтому дальнейшее рассмотрение будет относиться именно к этому случаю.

Предполагая условие (4) выполненным, получим формулы для коэффициента пропускания и ширины полосы активного интерферометра на пороге самовозбуждения:

$$G_{0\text{пор}} = \frac{t_1 t_2 e^{kl-a}}{(1 - e^{kl-k_0 l})^2}, \quad (5) \quad \delta\nu_{\text{пор}} = \frac{c}{2\pi L} \frac{1 - e^{kl-k_0 l}}{\sqrt{e^{kl-k_0 l}}}. \quad (6)$$

Зависимость величин $G_{0\text{пор}}$ и $\delta\nu_{\text{пор}}$ от мощности входного (или выходного) сигнала определяется характером насыщения коэффициента усиления. Считая, что в интерферометре возбуждается основной поперечный тип колебаний ТЕМ₀₀, используем для коэффициентов усиления формулы, учитывающие радиальную неоднородность поля в резонаторе. Они имеют вид [9]:

для однородно уширенной линии активного вещества

$$k = k_0 \frac{\ln(2\gamma + 1)}{2\gamma}, \quad (7)$$

для неоднородно уширенной линии

$$k = k_0 \frac{\sqrt{2\gamma + 1} - 1}{\gamma}, \quad (8)$$

¹ Исключение составляет случай особо малых входных сигналов, когда из-за разного рода неустойчивостей активного интерферометра могут иметь место значительные флуктуации мощности выходного сигнала.

где $\gamma = \frac{W_{\text{вн}}}{\omega_0 S}$ — нормированная внутренняя мощность; $W_{\text{вн}}$ — полная внутренняя мощность; ω_0 — параметр насыщения; $S = \pi \rho^2$ — величина эффективного сечения светового пучка ТЕМ₀₀ типа колебаний внутри интерферометра (ρ — радиус пучка).

Нормированная выходная мощность $\beta = \frac{W_{\text{вн} \times}}{\omega_0 S}$ выражается через нормированную внутреннюю мощность с помощью соотношения

$$\beta = \frac{t_2}{1 + R_2} \gamma. \quad (9)$$

На основании (7) и (8) с учетом (4), (9) для коэффициента усиления активной среды интерферометра, работающего на пороге самовозбуждения, имеем выражения:

в случае однородно уширенной линии

$$k = k_0 \frac{(1 - b_2) \sqrt{\kappa} - e^{-k_0 l + a}}{2\beta (\sqrt{\kappa} + e^{-k_0 l + a})} \ln \left[\frac{2\beta (\sqrt{\kappa} + e^{-k_0 l + a})}{(1 - b_2) \sqrt{\kappa} - e^{-k_0 l + a}} + 1 \right], \quad (10)$$

в случае неоднородно уширенной линии

$$k = k_0 \frac{(1 - b_2) \sqrt{\kappa} - e^{-k_0 l + a}}{\beta (\sqrt{\kappa} + e^{-k_0 l + a})} \left[\sqrt{\frac{2\beta (\sqrt{\kappa} + e^{-k_0 l + a})}{(1 - b_2) \sqrt{\kappa} - e^{-k_0 l + a}} + 1} - 1 \right], \quad (11)$$

где $\kappa = \frac{R_1}{R_2}$; b_1, b_2 — коэффициенты поглощения в зеркалах.

Если выходная мощность $\beta \rightarrow 0$ и, следовательно, $kl \rightarrow k_0 l$, то, как видно из формул (5—6), $G_{0 \text{ пор}} \rightarrow \infty$ и $\delta v_{\text{пор}} \rightarrow 0$. Таким образом, разрешающая сила интерферометра тем больше, чем меньше уровень выходного (a значит, и входного) сигнала.

Кривые зависимости коэффициента передачи интерферометра от уровня выходной мощности, построенные по формулам (5), (10), (11) для неоднородно и однородно уширенной линии, приведены на рис. 1 (кривые 1, а, б). Графики рассчитаны для значений $k_0 l = 0,08$; $a = 0,04$; $b_1 = b_2 = 0,005$; $\kappa = 1$. Там же для сравнения изображены аналогичные кривые, рассчитанные в предположении, что на интерферометр падает плоская однородная волна [4].

Для тех же параметров на рис. 2 изображена зависимость ширины полосы пропускания интерферометра от величины выходной мощности, построенная по формулам (6), (10), (11).

Коэффициент передачи, а также ширина полосы пропускания будут существенным образом зависеть от соотношения коэффициентов отражений зеркал интерферометра, характеризуемого параметром κ . Зависимость коэффициента передачи интерферометра, работающего на пороге самовозбуждения от κ , изображена на рис. 3. Как видно из рис. 3, на пороге самовозбуждения оптимальным с точки зрения достижения максимального коэффициента передачи является интерферометр со слегка различающимися коэффициентами отражения зеркал (R_1 немного больше R_2). Заметим, что это различие возникает только при учете насыщения активной среды. В отсутствие насыщения, как и в пассивном интерферометре, максимальный коэффициент передачи достигается в случае симметричных зеркал при $R_1 = R_2$ (предполагается, что $b_1 = b_2$).

Изучение амплитудных и частотных характеристик активного интерферометра производилось на установке, изображенной на рис. 4. Исследуемый интерферометр образован плоским зеркалом M_3 и сфери-

ческим зеркалом M_4 с радиусом кривизны 3 м. Коэффициенты отражения зеркал равнялись соответственно 94 и 98%. Длина резонатора составляла 130 см. Внутри резонатора располагались усилительная трубка с He—Ne смесью 1, а также пластины калиброванного ослабителя 2, 3. В интерферометр направлялось излучение одночастотного He—Ne

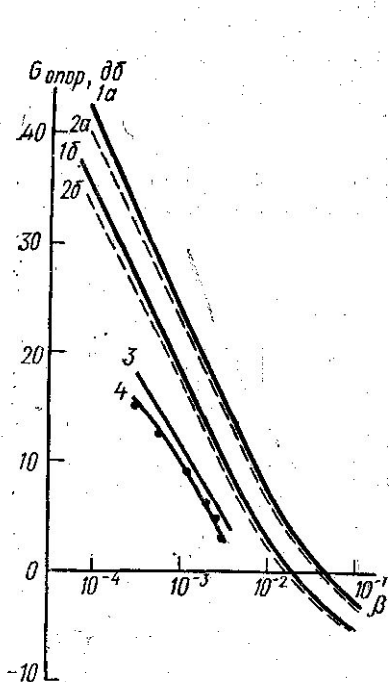


Рис. 1. Зависимость эффективности передачи $G_{\text{нор}}$ интерферометра от нормированной выходной мощности β . 1а и 1б — теоретические кривые для неоднородно и однородно уширенной линии (TEM₀₀ — тип колебаний); 2а и 2б — плоская однородная волна ($k_{01}=0,08$, $a=0,04$, $b_1=b_2=0,005$; $\kappa=1$); 3 — теоретическая кривая для неоднородно уширенной линии (TEM₀₀—тип колебаний), соответствующая экспериментальным значениям параметров ($\kappa=0,96$, остальные параметры те же); 4 — экспериментальная кривая

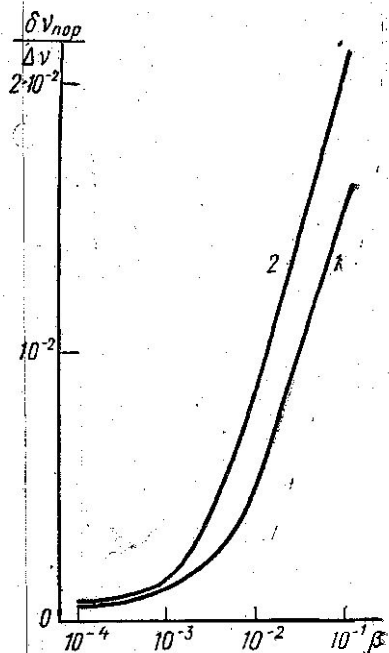


Рис. 2. Зависимость ширины полосы пропускания $\delta\nu_{\text{нор}}$ от величины выходной мощности β ($\Delta\nu = \frac{c}{2L}$): 1 — неоднородно уширенная линия, 2 — однородно уширенная линия

лазера, генерировавшего в режиме TEM₀₀ типа колебаний на линии 6328 Å. При выбранных геометрических размерах резонаторов лазера и интерферометра обеспечивалось хорошее согласование параметров входного пучка с параметрами интерферометра. Перед входным зеркалом M_3 располагались нейтральный светофильтр и оптическая развязка. Прошедшее интерферометр излучение регистрировалось фотоумножителем δ , сигнал с которого поступал на осциллограф С1-4. Частота лазера сканировалась путем перемещения одного из его зеркал при помощи пьезокерамики. На пьезокерамику подавалось пилообразное напряжение с X — пластины осциллографа. При сканировании частоты лазера на экране осциллографа наблюдались резонансные пики возбу-

ждаемых в интерферометре типов колебаний. Присутствие на экране осциллографа слабых резонансных пиков, принадлежащих высшим поперечным типам колебаний, позволяло, используя теоретическую величину разности частот, прокалибровать горизонтальную шкалу осциллографа в единицах частоты. Вертикальная шкала осциллографа была прокалибрована в абсолютных единицах мощности. Зная мощность

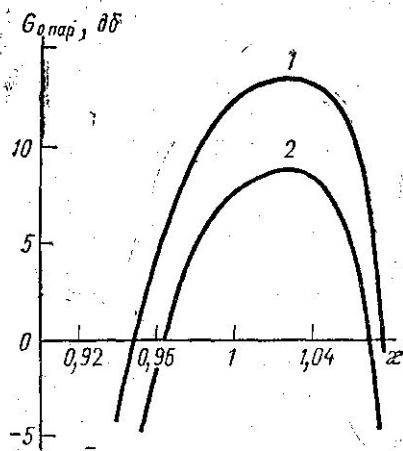


Рис. 3. Коэффициент передачи интерферометра $G_{\text{опор}}$ в зависимости от параметра $\kappa = \frac{R_1}{R_2}$ ($R_0 l = 0,08$, $a = 0,04$, $b_1 = b_2 = 0,005$, $\beta = 0,004$); 1 — неоднородно уширенная линия, 2 — однородно уширенная линия

входного сигнала, по амплитудам резонансных пиков можно было определять коэффициент передачи интерферометра. Измерение ненасыщенного коэффициента усиления активной среды выполнялось при помощи калиброванного ослабителя. При этом вместо зеркал M_3 и M_4 устанавливались зеркала с коэффициентом отражения 99,5%.

На рис. 1 изображена экспериментальная зависимость коэффициента передачи интерферометра, работающего на пороге самовозбуж-

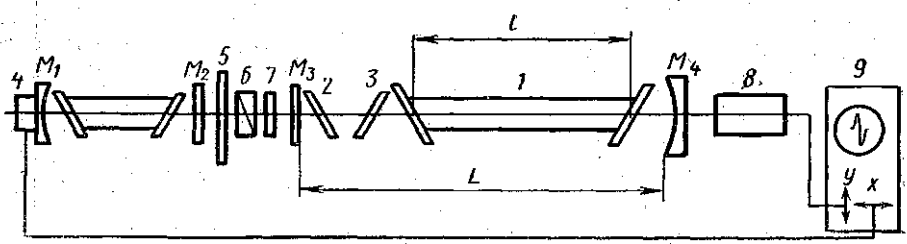


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: M_1, M_2 — зеркала генератора, M_3, M_4 — активного интерферометра, 1 — усилительная трубка активного интерферометра, 2, 3 — пластины калиброванного ослабителя, 4 — пьезокерамический блок, 5 — нейтральный светофильтр, 6 — призма Николя, 7 — четвертьволновая пластинка, 8 — фотоумножитель, 9 — осциллограф

дения, от нормированной выходной мощности (кривая 4). Уровень мощности изменялся с помощью нейтральных светофильтров, ослабляющих входной сигнал. Теоретическая кривая (3) построена в предположении неоднородного уширения линии по формулам (5) и (11) для значений параметров, соответствующих эксперименту: $k_0 l = 0,08$, $a = 0,04$, $b_1 = b_2 = 0,005$, $\kappa = 0,96$, $S = 1 \text{ мм}^2$. При нормировании эксперимен-

тальных значений мощности параметр насыщения [10] был равен 25 мвт/мм^2 ¹.

Совпадение экспериментальных данных с теоретической зависимостью следует признать удовлетворительным. Сдвиг теоретической кривой относительно экспериментальной может быть отнесен за счет ошибки абсолютных изменений мощности и приближенного характера величины параметра насыщения, использовавшегося для их нормировки.

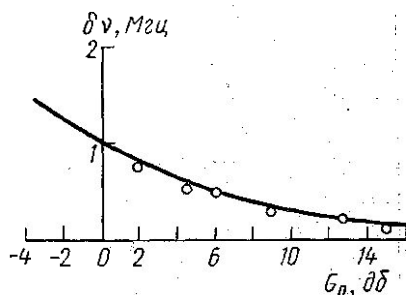


Рис. 5. Связь полосы пропускания резонатора $\delta\nu$ с коэффициентом передачи $G_{\text{опор}}$ (теоретическая кривая и экспериментальные точки)

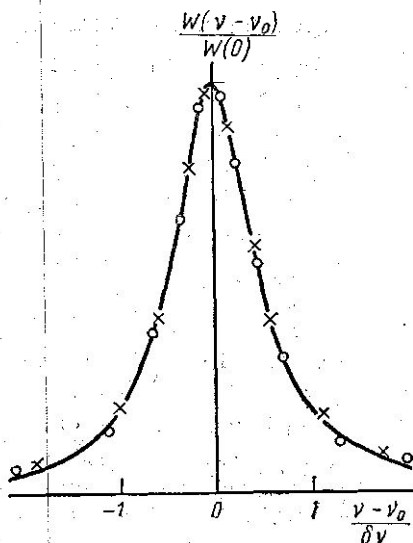


Рис. 6. Форма контуров пропускания активного и пассивного интерферометра: — теоретический лоренцевский контур, \circ — активный интерферометр, \times — пассивный интерферометр, ν_0 — резонансная частота

И теоретические, и экспериментальные данные показывают, что коэффициент передачи активного интерферометра быстро уменьшается с ростом уровня мощностей. При этом одновременно наблюдается и уширение полосы пропускания интерферометра $\delta\nu$. На рис. 5 приведены экспериментальные значения $\delta\nu$ при различных величинах коэффициента передачи. Связь величин $\delta\nu$ и G_0 хорошо описывается теоретической кривой, построенной по формуле (2). Применяемая нами методика не позволяла измерять ширины резонансов меньше $0,1 \text{ мгц}$. Однако нужно отметить, что эта величина далеко не является предельной.

Были выполнены измерения формы контура пропускания интерферометра. Они показали, что в активном интерферометре, как и в пассивном, форма контура пропускания с хорошим приближением является лоренцевской (см. рис. 6).

Нами был изготовлен активный интерферометр с повышенной механической и термической стабильностью, который был применен для анализа спектра излучения He—Ne лазера в линии 6328 \AA . Внутри резонатора длиной 25 см , образованного плоским и вогнутым ($r=3 \text{ м}$) зеркалами с коэффициентами отражения 99% , помещалась газоразрядная трубка с He—Ne-смесью (диаметр капилляра 1 мм , активная длина 14 см).

¹ Использование данной величины параметра насыщения, полученной для многократной генерации, является в значительной степени условным, и она скорее должна рассматриваться как некоторый нормировочный множитель экспериментальных значений мощности.

Заполнение трубки подбиралось таким образом, чтобы в генерации, которая наблюдалась при перевозбуждении интерферометра, лембовский провал отсутствовал, и контур мощности в функции расстройки частоты имел плоскую вершину. Корпус интерферометра был изготов-

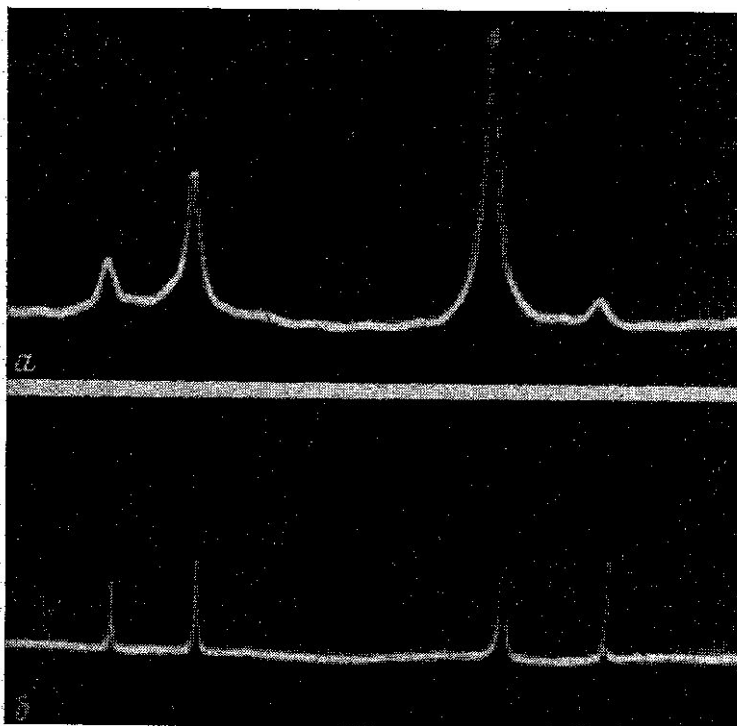


Рис. 7. Осциллограммы спектра мод линии 6328 Å He — Ne лазера, полученные с помощью сканирующего интерферометра: *а*—пассивный интерферометр, *б* — активный интерферометр

лен из плавленного кварца. Сканирование интерферометра осуществлялось при помощи пьезокерамики. О преимуществах активного интерферометра дают представление осциллограммы спектра лазерного излучения, представленные на рис. 7. Осциллограмма на рис. 7, *а* получена с помощью пассивного интерферометра (внутренняя газоразрядная трубка не возбуждена), осциллограмма на рис. 7, *б* представляет запись того же спектра активным интерферометром, находящимся вблизи порога самовозбуждения. Наряду со значительным сужением резонансных пиков в активном интерферометре обращает на себя внимание нелинейное искажение интенсивности компонентов сигнала, обусловленное насыщением усиливающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басов Н. Г., Грасюк А. З., Зубарев И. Г., Тевелев Л. В. «Квантовая радиофизика», труды ФИАН, 31, 74, 1965.
2. Королев Ф. А. Теоретическая оптика, М., 1966.
3. Карлов Н. В., Прохоров А. М. «Радиотехника и электроника», 11, 267, 1966.

4. Андрияхин В. М., Басиев А. Г., Лебедева В. В., Одинцов А. И. «Радиотехника и электроника», 13, 733, 1968.
5. Чеченина Е. П., Чекалинская Ю. И. «Журн. прикладной спектроскопии», 11, 2, 242, 1969.
6. Raappanen R. Proceedings of the IRE, 50, 2115, 1962.
7. Boersch H., Herziger G. IEEE J. of Quantum. Electronics, 2, 9, 549, 1966.
8. Лебедева В. В., Одинцов А. И., Лебедев И. В., Андрияхин В. М., Гудович Э. С., Пономарева И. П. «Оптика и спектроскопия», 20, 501, 1966.
9. Одинцов А. И., Лебедева В. В., Шафрановская И. В. ЖЭТФ, 39, 879, 1969.
10. Spiller E. Zeit fur Phys., 182, 487, 1965.

Поступила в редакцию
1.9 1970 г.

Кафедра
оптики