



УДК 621.373.826

М.Ю. Керносов, Ю.В. Киселев, Г.В. Мельничук, Е.Г. Чуляева

ПОДАВЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ В ЧАСТОТНО-СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ ГЕЛИЙ-НЕОНОВЫХ ЛАЗЕРАХ

*M.Yu. Kernosov, Yu.V. Kiselev, G.V. Melnichuk, E.G. Chulyaeva*Research Institute of Gas Discharge Devices «PLASMA», JSC
24, Tsiolkovsky St., Ryazan, 390023, Russia.

POLARIZATION INSTABILITY REDUCTION IN FREQUENCY-STABILIZED HELIUM-NEON LASERS

Рассмотрено явление поляризационной неустойчивости в серийно выпускаемых гелий-неоновых лазерах, предназначенных для интерферометрии. Исследовано влияние фазовой анизотропии резонатора на поляризационную неустойчивость лазера. Предложен способ управления фазовой анизотропией резонатора с помощью магнитного поля.

ГЕЛИЙ-НЕОНОВЫЙ ЛАЗЕР. ФАЗОВАЯ АНИЗОТРОПИЯ. ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ.

Polarization instability phenomenon in mass-produced helium-neon lasers for interferometers is considered. Resonator phase anisotropy impact on laser polarization instability is investigated. The method of control of resonator phase anisotropy using a magnetic field is suggested.

HELIUM-NEON LASER. PHASE ANISOTROPY. POLARIZATION INSTABILITY.

Лазерные интерферометры на основе интерферометра Майкельсона и эффекта Доплера широко применяются для прецизионной регистрации перемещений в широком динамическом диапазоне. Источником излучения в таких устройствах является частотно-стабилизированный гелий-неоновый лазер, генерирующий две продольные моды с линейными ортогональными поляризациями [1]. Стабилизация частот продольных мод осуществляется путем разнесения в пространстве соответствующих им лазерных пучков, которые попадают на две различные площадки фотоприемника. Сигналом ошибки для системы обратной связи при автоматической настройке оптического резонатора является разность мощностей ортогонально поляризованных мод. В случае правильной настройки сигнал ошибки отсутствует.

В экспериментах, описанных в работах [2, 3], обнаружена неустойчивость поляри-

заций мод для некоторых гелий-неоновых лазеров с внутренними зеркалами, изготовленных в условиях серийного производства. Обнаруженный дефект исключает возможности применения таких приборов в лазерных интерферометрах.

Исследования, представленные в настоящей работе, были направлены на стабилизацию поляризаций продольных мод, генерируемых двухчастотным гелий-неоновым лазером, путем введения фазовой анизотропии в активный элемент.

Экспериментально изучены четыре гелий-неоновых лазера с внутренними зеркалами, генерирующие излучение с длиной волны 0,6328 мкм. Их активная среда возбуждается разрядом постоянного тока в канале (его диаметр 0,9 мм, длина 180 мм), наполненном до давления 2,8 Торр с соотношением концентраций гелия и неона, равным 9 : 1. Активная среда размещена в оптическом резонаторе длиной 235 мм, об-

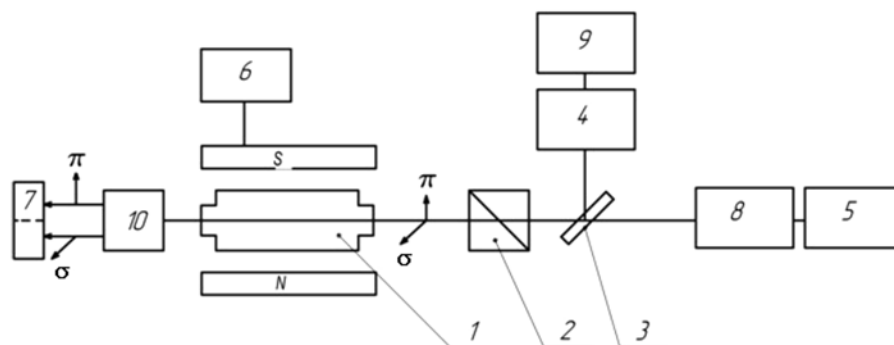


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – лазер, помещенный в поперечное магнитное поле; 2 – поляризатор; 3 – поворотное полупрозрачное зеркало; 4 – сканирующий интерферометр Фабри – Перо; 5 – анализатор спектра С4-74 (СК4-59); 6 – источник питания магнитного поля и устройство формирования поперечного магнитного поля; 7 – секторный фотоприемник, подключенный к мультиметру, соединенному с компьютером; 8 – фотоэлектронный умножитель ФЭУ-55; 9 – осциллограф С1-117; 10 – поляризатор; σ , π – обозначения направлений ортогональных поляризаций

разованном плоским и сферическим зеркалами, радиус кривизны сферического зеркала составляет 0,5 м.

Поляризационно-частотные характеристики излучения лазеров исследованы с помощью установки, схема которой приведена на рис. 1.

Излучение лазера 1 направляется на поляризатор 2. Светоделительная пластина 3 направляет часть мощности падающего излучения на вход сканирующего интерферометра Фабри – Перо 4 (СКИФ), а другую часть – на фотоэлектронный умножитель 8, сигнал на выходе которого регистрируется с помощью анализатора спектра 5. Сигнал с фотоприемника сканирующего интерферометра поступает на вход осциллографа С1-117, развертка которого синхронизирована с колебаниями расстояния между зеркалами интерферометра; разрешение сканирующего интерферометра по частоте составляет 20 МГц, область свободной дисперсии – 2 ГГц. На экране осциллографа отображается частотный спектр излучения, вышедшего из поляризатора; диапазон изменения напряжения на пьезоэлектрическом преобразователе, перемещающем одно из зеркал интерферометра, соответствует полосе обзора, в пределах которой помещается два порядка частотного спектра.

Излучение лазера, выходящее со стороны противоположного зеркала, разделяется

на два пучка с ортогональными поляризациями, которые направляются на соответствующие секции фотоприемника 7. Электрические сигналы фотоприемников после усиления регистрируются с помощью мультиметра АРРА, соединенного с компьютером для непрерывной записи данных.

Рис. 2 иллюстрирует формирование сигнала ошибки при перестройке частот двух продольных мод вследствие самопрогрева лазера. Изменение длины резонатора приводит к перемещениям частот продольных мод в пределах полосы усиления активной

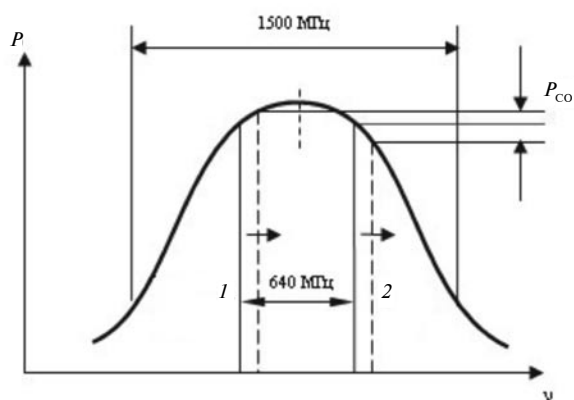


Рис. 2. Формирование сигнала ошибки при изменении длины резонатора двухчастотного лазера; 1, 2 – горизонтальная и вертикальная моды, соответственно; P_{co} – мощность сигнала ошибки

среды при неизменном межмодовом интервале. В процессе перестройки резонатора, при прогреве частота каждой из мод плавно меняется в пределах всей полосы усиления. Для правильной настройки необходимо поддерживать симметричные смещения модовых частот относительно центра полосы усиления. Если длина резонатора выбрана так, чтобы частоты соседних продольных мод были одинаково удалены от центра полосы, то мощности обеих мод одинаковы и сигнал ошибки равен нулю. В случае расстройки спектр продольных мод несимметричен и возникает разбаланс мощностей, что приводит к появлению сигнала ошибки.

Опыт серийного производства двухчастотных гелий-неоновых лазеров показывает, что существуют ситуации, в которых автоматическое поддержание симметричной настройки резонатора невозможно, так как поляризации мод хаотически изменяются, оставаясь при этом ортогональными.

На рис. 3 приведены два случая существования поляризационной нестабильности (перескока), причем во втором из них возможна правильная настройка (рис. 3, б), а в первом (рис. 3, а) невозможно обеспечить равенство мощностей ортогонально поляризованных мод, так как при симметричной настройке относительно центра контура каждая из поляризаций изменяет свое направление на ортогональное.

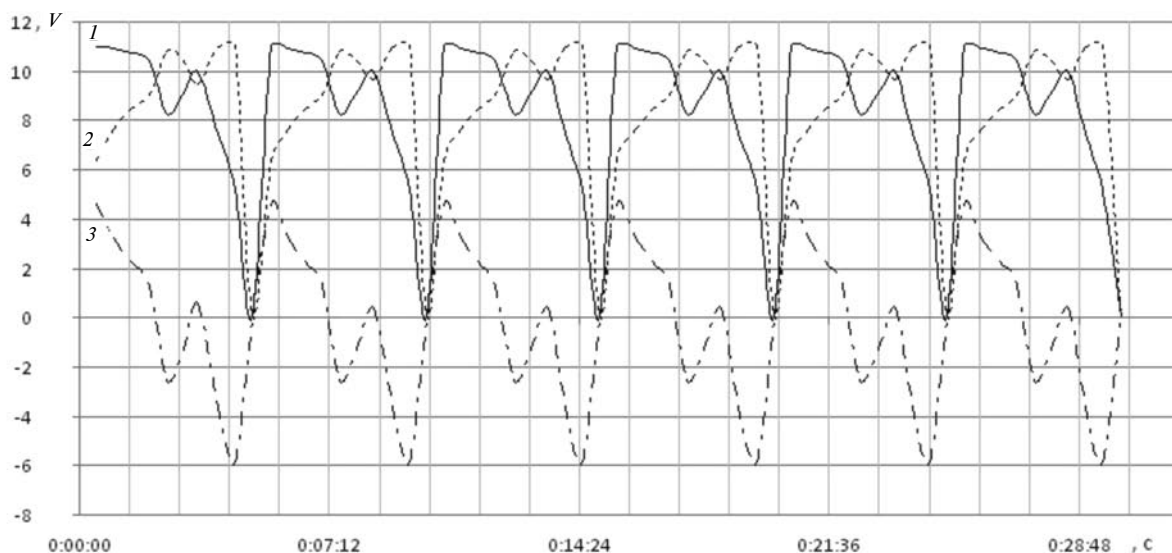
В процессе эксперимента исследованы активные элементы двухчастотных гелий-неоновых лазеров, которые проявили качественно различные поляризационные свойства. В первом случае поляризации соседних мод не имеют стабильной пространственной ориентации, т. е. направления оптических колебаний векторов напряженности электрических полей изменяются случайным образом в процессе перестройки резонатора. При измерении параметров излучения такого активного элемента с помощью сканирующего интерферометра Фабри – Перо невозможно зарегистрировать мощность излучения для каждой моды, так как при спонтанном изменении направления поляризации поляроид, настроенный на пропускание определенной

поляризации, пропускает волны, которые соответствуют обеим модам, и соотношение их мощностей изменяется хаотически. Таким образом, экспериментальная установка не позволяла определять соотношение мощностей генерируемых лазером мод (см. рис. 3, а). Их разностный сигнал был несимметричным и проходил через нуль, т. е. точку стабилизации лазерной частоты, несколько раз. В этом случае диапазон отработки сигнала ошибки был недостаточным для соответствующей отработки колебаний расстройки резонатора. Пределы колебаний резонатора, которые компенсируются системой АПЧ, в основном, зависят от диапазона изменения внешней температуры и прописаны в технических условиях на прибор. Таким образом, активные элементы, для которых явление поляризационной нестабильности наблюдается вблизи четверти контура, следует считать производственным браком.

Во втором случае наблюдается стабильная пространственная поляризация ортогонально-поляризованных мод лазерного излучения (см. рис. 3, б). При равенстве мощностей моды будут находиться симметрично относительно центра контура. Этой ситуации будет соответствовать участок на графике разностного сигнала, где осуществляется переход через нуль – точку стабилизации. Разностный сигнал антисимметричен относительно этой точки, что позволяет эффективно обрабатывать колебания расстройки резонатора. Такие лазеры можно использовать в качестве источника лазерного излучения в приборах интерферометрии: стабильные ортогональные поляризации генерируемых мод дают возможность разделять лазерный пучок в пространстве, причем одна из поляризаций является опорным сигналом, а другая – информационным, что позволяет регистрировать перемещения до долей микрон.

В ходе эксперимента поляризационные свойства активных элементов удалось стабилизировать путем наложения на часть активного элемента постоянного магнитного поля величиной $5 < H < 50$ мТл. Предположительно резонаторы некоторых активных элементов изначально обладают случайной

a)



b)

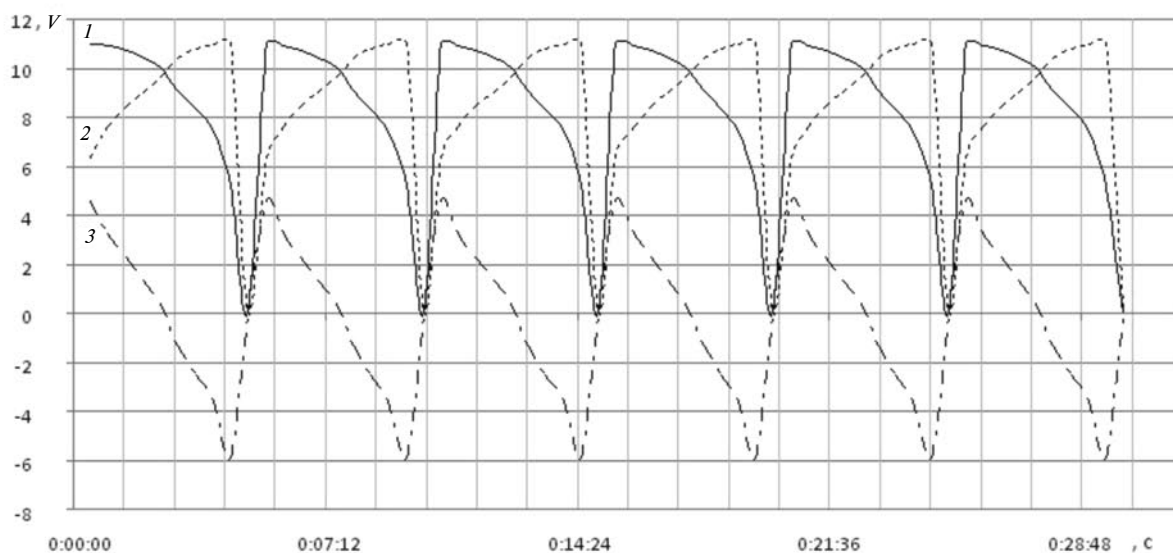


Рис. 3. Экспериментальные зависимости мощности ортогонально-поляризованных мод (1, 2) и разностного сигнала (3) от времени; представлены случаи, когда правильная настройка невозможна (a) и когда она возможна (b)

фазовой анизотропией по отношению к волнам с ортогональными поляризациями, что связано с индивидуальными особенностями используемых зеркал. В этом случае и реализуется стабильная поляризация продольных мод, генерируемых лазером. В случае, когда распределение мод в резонаторе полностью изотропно, направления

поляризаций меняются в процессе его перестройки (см. рис. 3, a).

Экспериментально было установлено, что постоянное магнитное поле, приложенное к части активного элемента (на юстировочные узлы), вносит в резонатор разность набега фаз Δ , что приводит к увеличению поляризационно-фазовой анизотропии.

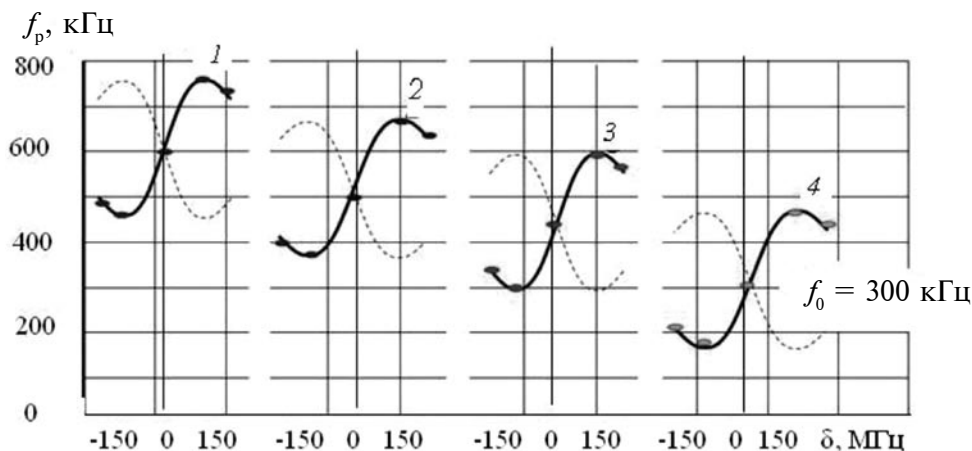


Рис. 4. Зависимости разностной частоты от расстройки резонатора для четырех активных элементов; номера кривых соответствуют номерам активных элементов; сплошные и пунктирные кривые соответствуют разностной частоте при противоположных направлениях приложенного магнитного поля напряженностью 36 мТл

Следовательно, чтобы выяснить причины нестабильности поляризационных характеристик у части активных элементов, необходимо количественно охарактеризовать поляризационно-фазовую анизотропию резонатора.

Во второй части эксперимента мы настраивали резонатор на центр контура усиления, так чтобы одна мода находилась в центре, а соседние – за пределами контура. Перестройка осуществлялась за счет самопрогрева резонатора, при этом в ее процессе на анализаторе спектра наблюдалась разностная частота вблизи центра контура. При наложении поперечного магнитного поля центральная мода расщепляется на две, и их разность образует частоту расщепления f_p . С помощью анализатора спектра С4-74 мы определяли разностную частоту, накладывая на каждый активный элемент поперечное

Экспериментальные значения параметров для четырех гелий-неоновых лазеров

Номер активного элемента	f_0 , кГц	Δ , 10^{-4} рад
1	600	15
2	500	12
3	420	10
4	300	7

магнитное поле величиной 36 мТл. Затем снимали зависимость разностной частоты от расстройки резонатора.

Разностная частота f_0 , которая образуется при включении магнитного поля, соответствует центру контура усиления. Это значение служило для определения поляризационно-фазовой анизотропии резонатора при использовании партии исследуемых активных элементов (см. таблицу):

$$\Delta = \frac{f_p 2\pi L}{c} \cong 10^{-3} \text{ рад,}$$

где L – длина резонатора.

Необходимо отметить, что фазовая анизотропия резонатора не воспроизводилась от одного активного элемента к другому (как следует из рис. 4). Поэтому для достижения эффекта стабильности поляризации юстировочные узлы активных элементов намагничивались по-разному (путем наложения поперечного магнитного поля к части активного элемента).

Наибольшее значение фазовой анизотропии составляло 0,0015 рад для активного элемента длиной 220 мм; ей соответствовала разностная частота, равная примерно 600 кГц, при наложении поперечного магнитного поля величиной 30 мТл. При значениях фазовой анизотропии не ниже 0,001 были получены устойчивые ортогональные поляризации.

Существование поляризационной неустойчивости объясняется в работе [2] через исследование уравнений движения, представленных в монографии [3].

Как показано в работе [2], интенсивность излучения I_1, I_2 каждой из поляризованных мод определяются коэффициентами усиления, само- и взаимонасыщения:

$$I_{1,2} = \frac{\alpha_1 \beta_1 - \alpha_2 \theta_{12}}{\beta_1 \beta_2 - \theta_{21} \theta_{12}}, \quad (1)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты усиления на каждой из ортогонально-поляризованных мод; β_1, β_2 – коэффициенты самонасыщения; θ_{12}, θ_{21} – коэффициенты взаимонасыщения (выражения для четырех последних коэффициентов берутся из работы [3]).

Коэффициент усиления как функция от расстройки приведен, например, в работе [3]. В это выражение нами введен коэффициент, связанный с добротностью резонатора Q . После преобразований выражение (1) приобретает следующий вид:

$$I_{1,2} = [a_0 \exp(-(\delta / Ku)^2) - Q^{-1}] \times (\beta_1 - \theta_{12}) / (\beta_1 \beta_2 - \theta_{21} \theta_{12}), \quad (2)$$

где $\alpha_1 = \alpha_2 = a_0 \exp[-(\delta / Ku)^2]$ – ненасыщенные коэффициенты усиления для каждой из поляризационных мод (они равны между собой); $Ku = 900$ МГц; δ – расстройка резонатора в пределах 1500 МГц; Q – добротность резонатора.

Авторы работы [2] получили устойчивые поляризации за счет повышения парциального давления неона.

Однако дальнейшие эксперименты показали, что при использовании зеркал с меньшими рассеянием и потерями на поглощение (с целью повышения мощности генерации) увеличение парциального давления неона для повышения устойчивости оказалось неэффективным. Как следует из равенства (2), улучшение качества зеркал (путем снижения рассеяния и потерь на поглощение) приводит к превышению усиления над потерями и усилению конкуренции между ортогонально-поляризованными модами.

Коэффициенты β и θ определяются только свойствами среды, которую, в свою оче-

редь, можно изменять только наполнением. Поэтому эффективнее будет, на наш взгляд, изменение добротности резонатора, причем так, чтобы для каждой из поляризаций значения добротности были различны. При этом появляются как фазовая, так и амплитудная анизотропии резонатора. Следует отметить, что явление возникновения фазовой анизотропии при наложении магнитного поля на юстировочные узлы резонатора было изучено только экспериментально и для теоретического объяснения явления необходимы дополнительные исследования.

Используя данные, приведенные в работе [2], мы провели оценку влияния фазовой анизотропии резонатора. Для этого в выражения $I_1(\delta)$ и $I_2(\delta)$ [2] были введены функции изменения добротности резонатора (с учетом фазовой анизотропии), выражения для $\beta_1, \beta_2, \theta_{12}, \theta_{21}$ и построена зависимость интенсивности от расстройки резонатора (расчет приведен далее для одного конкретного случая как пример, позволяющий оценить влияние фазовой анизотропии резонатора):

$$I_1(\delta) = \left[\left[a_0 \exp(-(\delta / Ku)^2) - (Q \sin(0, 2))^{-1} \right] \times \left[\left[1 + G^2 / (G^2 + (\delta / 4)^2) \right] - \left[1 + G^2 / (G^2 + (\delta / 4)^2) + G^2 \left[c G^2 (\gamma_1 \cdot \gamma_2)^{-1} \left[G^2 + (\delta / 4 + 640)^2 \right] \right] \right] \right] \times \left[\left[\left[1 + G^2 / (G^2 + (\delta / 4)^2) \right]^2 - \left[1 + G^2 / (G^2 + (\delta / 4)^2) + G^2 \left[c G^2 \left[\gamma_1 \cdot \gamma_2 \right]^{-1} \left[G^2 + (\delta / 4 + 640)^2 \right] \right]^{-1} \right] \right] \right]^{-1} ;$$

$$I_2(\delta) = \left[\left[1, 9^{-1} a_0 \exp(-(\delta / Ku)^2) - Q^{-1} \right] \times \left[\left[1 + G^2 / (G^2 + (\delta / 4)^2) \right] - \left[1 + G^2 / (G^2 + (\delta / 4)^2) + G^2 \left[c G^2 (\gamma_1 \cdot \gamma_2)^{-1} \left[G^2 + (\delta / 4 + 640)^2 \right] \right] \right] \right] \times \left[\left[\left[1 + G^2 / (G^2 + (\delta / 4)^2) \right]^2 - \left[1 + G^2 / (G^2 + (\delta / 4)^2) + G^2 \left[c G^2 \left[\gamma_1 \cdot \gamma_2 \right]^{-1} \left[G^2 + (\delta / 4 + 640)^2 \right] \right]^{-1} \right] \right] \right]^{-1} ,$$

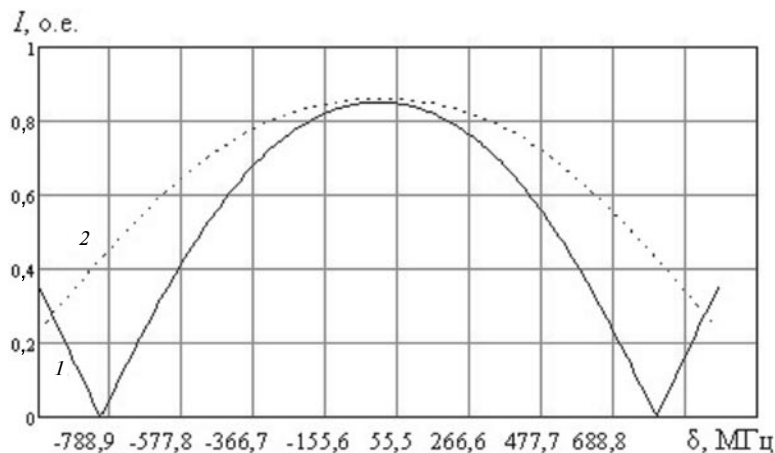


Рис. 5. Зависимость интенсивности от расстройки резонатора при различных значениях добротности резонатора $Q = f(\Delta)$, где Δ – фазовая анизотропия резонатора

где γ_1, γ_2 – естественная ширина линии; G – лоренцева ширина линии излучения; 640 – частотное расстояние между двумя поляризациями; $\sin(0,2)$ – экспериментальное значение фазовой анизотропии; 1,9 – экспериментальное значение амплитудной анизотропии.

Внесение фазовых потерь (рис. 5, кривая 2) приводит к появлению однородности в зависимости интенсивности от расстройки резонатора, причем снижение интенсивности происходит на четверти контура, при снижении фазовой анизотропии примерно до 0,0014 рад. Оценочные данные совпали с экспериментальными результатами.

Таким образом, наличие совокупности факторов, а именно соотношения усиления и потерь резонатора (причем как фазовых, так и изотропных) определяет бистабильность поляризации при расстройке резонатора. Для исключения поляризационной нестабильности предлагается ввести в резонатор фазовую анизотропию величиной не менее 0,0014 рад, например, путем наложения поперечного магнитного поля к части активного элемента. Следует отметить, что такое техническое решение позволяет исключить брак при выпуске серийных лазеров, стабилизированных по равенству интенсивностей ортогонально поляризованных мод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Власов, А.** Частотно-стабилизированные гелий-неоновые лазеры для интерферометрии [Текст] / А. Власов, С. Хилов // Фотоника. – 2007. – Вып. 5. – С. 7–9.

2. **Арефьев, А.С.** Стабильная генерация в частотно-стабилизированном гелий-неоновом

лазере [Текст] / А.С. Арефьев, С.П. Борисовский, А.А. Кондрахин, Е.Г. Чуляева // Вестник РГРТА. – 2004. – Вып.14. – С. 80–83.

3. **Войтович, А.П.** Магнитооптика газовых лазеров [Текст] / А.П. Войтович. – Минск: Наука и техника, 1984. – 208 с.

КЕРНОСОВ Максим Юрьевич – научный сотрудник НПК «Лазер» ОАО «Плазма». 390023, г. Рязань, ул. Циолковского, 24
mkern@yandex.ru

КИСЕЛЕВ Юрий Владимирович – инженер-технолог НПК «Лазер» ОАО «Плазма». 390023, г. Рязань, ул. Циолковского, 24
Yuri_kis@mail.ru

МЕЛЬНИЧУК Геннадий Васильевич – генеральный директор ОАО «Плазма».
390023, г. Рязань, ул. Циолковского, 24
mkern@yandex.ru

ЧУЛЯЕВА Елена Георгиевна – доктор технических наук, старший научный сотрудник НПК «Лазер» ОАО «Плазма».
390023, г. Рязань, ул. Циолковского, 24
elenachuljaeva@yandex.ru