

УДК 621.373.826

Исследование влияния магнитных полей на двухчастотный активный элемент гелий-неонового лазера

© 2020 г. **В. С. Зоркин; Е. Г. Чуляева, доктор техн. наук; Е. Ю. Гомозкова**

Акционерное общество «Плазма», Рязань

E-mail: mera@plasmalabs.ru, elenachuljaeva@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.01.2020

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-06-18-23

В настоящей работе исследовано влияние магнитных полей на выходную мощность лазерного излучения и форму амплитудно-частотной характеристики с целью создания стабилизированного по мощности лазера.

Ключевые слова: амплитудно-частотная характеристика, магнитное поле, мощность, стабилизированный лазер.

Код OCIS: 140.3425.

1. ВВЕДЕНИЕ

Важнейшую роль в обеспечении качества и конкурентоспособности продукции практически всех отраслей промышленности, возможности проведения научных исследований играет контрольно-измерительная техника, в которой особое место занимают средства измерения и контроля геометрических параметров ответственных деталей, узлов машин и механизмов.

Ключевым элементом таких средств измерения является источник когерентного оптического излучения.

Одним из наиболее часто используемых источников является He-Ne лазер, работающей на длине волны 0,63 мкм.

He-Ne лазеры делятся на два типа: нестабилизированные и стабилизированные по одному из рабочих параметров.

Нестабилизированные модели отличаются большими выходными мощностями по сравнению со стабилизированными вариантами. Однако стабилизированные лазеры отличаются высокой временной когерентностью вплоть до километровых значений, что позволяет

производить измерения линейных и угловых размеров с нанометрической точностью.

Целью настоящей работы является исследование влияния магнитного поля на свойства лазерного излучения, обеспечивающих возможность создания малогабаритного стабилизированного по мощности (на уровне не менее 0,8 мВт) лазера повышенной когерентности (длина временной когерентности не менее 350 мм), работающего в одночастотном режиме, причём одночастотный режим обеспечивается длиной резонатора 135 мм и магнитными полями в режиме стабилизации. В свободном режиме наблюдаются при прогреве как одна частота, так и две частоты в контуре усиления.

2. ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ВЫХОДНУЮ МОЩНОСТЬ И ФОРМУ ЗАВИСИМОСТИ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ РАССТРОЙКИ РЕЗОНАТОРА

В соответствии с [2–5] при помещении двухчастотного активного элемента (лазерного излу-

чателя) в поперечное магнитное поле, интенсивности его ортогональных компонентов перераспределяются следующим образом.

Как видно из рис. 1, мощность одной из поляризаций снижается, а другой возрастает в зависимости от величины приложенного поперечного магнитного поля. Это объяснено тем фактом, что при настройке резонатора не на центр контура усиления показатели преломления для ортогональных компонентов излучения неравны между собой и различным образом меняются при наложении магнитного поля, что приводит к различному поведению интенсивностей поляризованных компонентов [6–9].

Существование бистабильных явлений объясняется с помощью Лэмбовских уравнений движения [4].

$$\dot{E}_1 = \alpha_1 E_1 - \beta_1 E_1^3 - \Theta_{12} E_1 E_2^2, \quad (1)$$

$$\dot{E}_2 = \alpha_2 E_2 - \beta_2 E_2^3 - \Theta_{21} E_2 E_1^2, \quad (2)$$

где α_1, α_2 — коэффициенты усиления, β_1, β_2 — коэффициенты самонасыщения, Θ_1, Θ_2 , — коэффициенты кросс-насыщения.

Учитывая двухчастотный спектральный состав исследуемых активных элементов, решение уравнений (1)–(2) выглядит следующим образом:

$$I_1 = \frac{-\alpha_2 \Theta_{12} + \beta_2 \alpha_1}{\beta_2 \beta_1 - \Theta_{21} \Theta_{12}}, \quad (3)$$

$$I_2 = \frac{-\alpha_2 \Theta_{21} + \beta_1 \alpha_2}{\beta_2 \beta_1 - \Theta_{21} \Theta_{12}}, \quad (4)$$

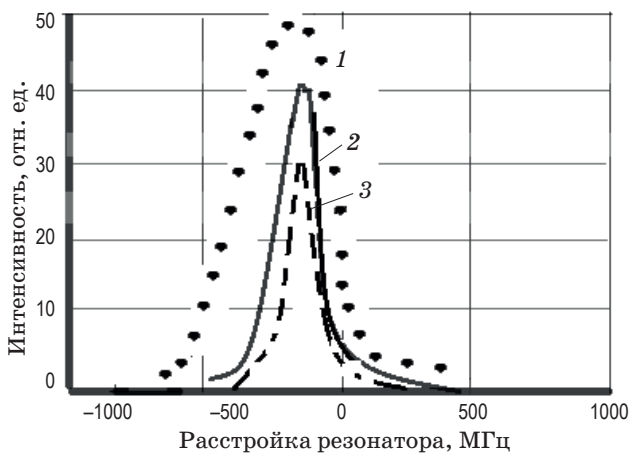


Рис. 1. Соотношение ширины контуров s -компонента при воздействии магнитного поля различной величины. 1 — 3183 А/м, 2 — 1591 А/м, 3 — 796 А/м.

где I_1 и I_2 — s - и p -ортогональные компоненты лазерного излучения.

Примем следующее условие для описанных уравнений:

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\beta_1}{\Theta_{21}} = \frac{\Theta_{12}}{\beta_2}. \quad (5)$$

Допустив, что амплитуда суммарной интенсивности при

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha, \quad (6)$$

$$\beta_1 = \beta_2 = \Theta_{12} = \beta. \quad (7)$$

ортогональных компонентов не меняется, запишем коэффициент усиления в виде

$$\alpha = 4\pi^{3/2} \frac{p^2 N e^{-\left(\frac{\xi}{K_u}\right)^2}}{3h\nu_D \pi} - \frac{1}{Q}, \quad (8)$$

где N — населённость верхнего энергетического уровня, p — дипольный момент, K_u — полуширина доплеровского контура, ξ — расстройка резонатора, Q — добротность резонатора.

$$\beta = \frac{\nu\sqrt{\pi} N p^4}{16\epsilon_0 h^3 \gamma_1 \gamma_2 K_u} \left(1 + \frac{G^2}{G^2 + \left(\frac{\xi}{4} - x\right)} \right), \quad (9)$$

где γ_1 — ширина верхнего энергетического уровня, γ_2 — ширина нижнего энергетического уровня, G — лоренцева ширина линии, ν_0 — центральная частота контура усиления.

Упрощённые выражения для коэффициентов кросс-насыщения будут выглядеть следующим образом:

$$\Theta_{12} = 1 + \frac{G^2}{G^2 + (\xi - 320)^2} + \frac{G^2}{G^2 + (\xi - 640)^2}, \quad (10)$$

$$\Theta_{21} = 1 - \frac{G^2}{G^2 + (\xi - 320)^2} - \frac{G^2}{G^2 + (\xi - 640)^2}. \quad (11)$$

Следует отметить, что 640 МГц — это частотный интервал для длины резонатора примерно 235 мм (такая длина резонатора взята для расчётов, так как в длинных активных элементах более ярко выражено взаимодействие интересующих нас ортогонально поля-

ризованных волн). 320 МГц — это расстояние от центра контура до частоты в резонаторе.

При воздействии на активную среду поперечного магнитного поля в резонаторе возникает наведённая фазовая анизотропия, оказывающая влияние на коэффициенты усиления, пропорциональная следующему выражению:

$$\chi_{\perp} = g\mu h_{\perp}, \quad (12)$$

$$\alpha = 4\pi^{3/2} \frac{p^2 N e^{-\left(\frac{\xi \pm \chi_{\perp}}{Ku}\right)^2}}{3hku\mu}, \quad (13)$$

где g — фактор Ланде, μ — магнетон Бора, h — напряжённость поперечного магнитного поля.

Продольное магнитное поле оказывает влияние на коэффициенты кросс-насыщения и описывается следующим образом:

$$\chi_{\parallel} = g\mu h_{\parallel}, \quad (14)$$

$$\theta_{12} = 1 + \frac{G^2}{G^2 + (\xi - \chi_{\perp} - 320)^2} + \frac{G^2}{G^2 + (\xi - \chi_{\perp} - 640)^2}, \quad (15)$$

$$\theta_{21} = 1 - \frac{G^2}{G^2 - (\xi - \chi_{\parallel} - 320)^2} - \frac{G^2}{G^2 - (\xi - \chi_{\parallel} - 640)^2} \quad (16)$$

Тогда, с учётом (3)–(16), зависимости интенсивностей ортогональных компонентов от величины магнитного поля, построенные по (15), (16), будут выглядеть следующим образом:

$$I(\zeta) = \frac{\frac{1}{a} \exp\left[-\left(\frac{2\xi \pm \chi_{\perp}}{Ku}\right)^2\right] \exp\left[-\left(\frac{b\xi}{1 \pm S\chi_{\parallel}}\right)^2\right] \frac{G^2}{G^2 + (\xi - \chi_{\perp})^2}}{B} \left(1 + \frac{G^2}{G^2 + (\xi - \chi_{\perp} - 320)^2}\right) \times \left(1 + \frac{G^2}{G^2 + (\xi - \chi_{\perp} + 320)^2}\right), \quad (17)$$

$$B = -\left(1 + \frac{G^2}{G^2 + (\xi - \chi_{\parallel} - 320)^2} + \frac{G^2}{G^2 + (\xi - \chi_{\parallel} - 640)^2}\right) \left(1 + \frac{G^2}{G^2 + (\xi - \chi_{\parallel} + 320)^2} + \frac{G^2}{G^2 + (\xi - \chi_{\parallel} - 640)^2}\right). \quad (18)$$

Как видно из рис. 1, при наложении на активную среду магнитного поля происходит перераспределение интенсивностей и ширины контуров расстройки.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Для проведения эксперимента был разработан измерительный стенд, блок-схема которого представлена на рис. 2 [10, 11].

Излучение активного элемента 11 с разрядным капилляром 12, питающегося от высоковольтного источника 8, через поляризатор 9, ориентированный таким образом, что после

него проходит лишь одна продольная мода, поступает на термостатированный фотоприёмник с усилителем 1. Сигнал с фотоприёмника регистрируется с помощью цифрового мультиметра 2 (АРРА 207), данные которого поступают на персональный компьютер 3. Одновременно с этим, излучение со стороны анодного зеркала через поляризатор 10, ориентированный аналогично поляризатору 9, поступает на сканирующий интерферометр 4. Сигнал со сканирующего интерферометра поступает на осциллограф 5. Помимо этого в стенд можно монтировать и демонтировать магниты 6 и 7.

Зарегистрированный сигнал будет представлять собой зависимость интенсивности выделенной моды от расстройки резонатора. Ввиду связи расстройки со временем прогрева

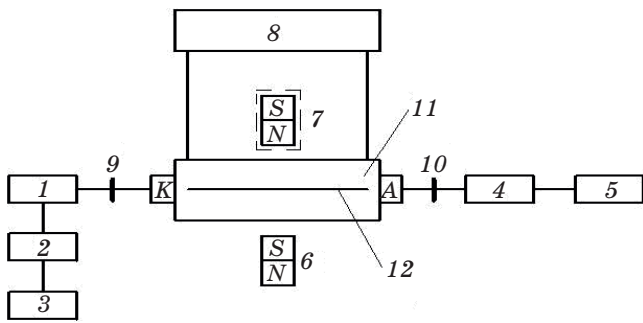


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

активного элемента зависимость построена во временной области.

Ввиду наличия в системе стабилизации лазеров фотоприёмного устройства, сигнал с приёмника 9 будет аналогичен тому, который используется в цепи стабилизации. Однако фотоприёмное устройство регистрирует лишь интенсивность сигнала и зачастую неспособно отобразить реальную картину амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) при наличии областей нестабильной поляризации. Для распознавания областей АЧХ с нестабильной поляризацией и служит сканирующий интерферометр.

На рис. 3 представлена экспериментально зарегистрированная эволюция АЧХ активного элемента длиной $L = 135$ мм в зависимости от величины магнитного поля.

Измерение величины магнитного поля вблизи поверхности перманентного магнита проводилось с помощью измерителя величины магнитной индукции Ш1-8 [12]. Распределение поля в разрядном капилляре моделировалось с помощью программы Finite Element Method Magnetics 4.2.

Проанализировав рис. 3, 4, можно заключить, что при наложении на часть активной среды комбинации продольного и поперечного магнитного поля, помимо перераспределения интенсивностей ортогональных компонентов лазерного излучения происходит изменение ширин амплитудно-частотных характеристик. При максимальном росте интенсивности p -компонента лазерного излучения в области магнитных полей до 6366 А/м (на 20%) происходит уширение контура на 50–60%. В случае с приложением магнитного поля без продольной составляющей (величиной порядка 9550 А/м) столь быстрого уширения не происходит.

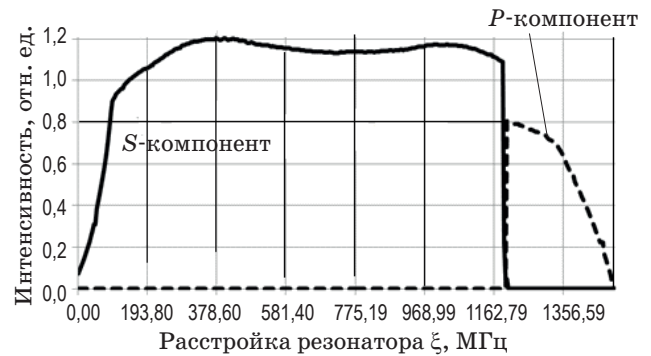


Рис. 3. Зависимость интенсивности излучения от расстройки резонатора.

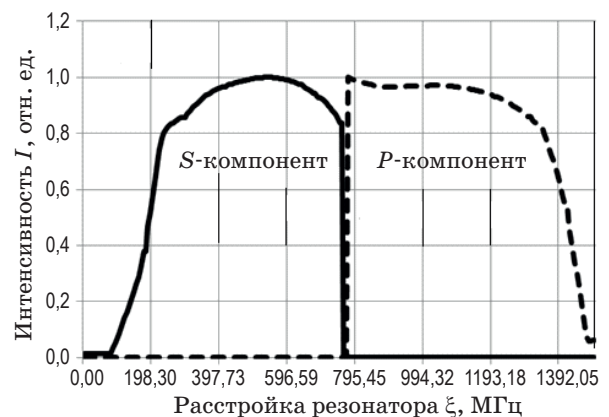


Рис. 4. Зависимость интенсивности излучения от расстройки резонатора при величине магнитного поля $B = 9550$ А/м при наличии магнита 7 в схеме, представленной на рис. 2.

Кроме того, наличие магнитного поля, ввиду наведения дополнительной фазовой анизотропии резонатора приводит к устранению зон поляризационной нестабильности.

Следует отметить, что без комбинации магнитных полей (продольного и поперечного) распределение интенсивностей ортогонально поляризованных мод носит симметричный характер, приведённый на рис. 4.

Таким образом, в совокупности с подавлением областей спонтанного изменения величины и направления вектора поляризации становится возможной устойчивая долговременная стабилизация частоты и мощности лазерного излучения. Данный факт обусловлен сдвигом точки разрыва кривой перестройки с максимума усиления, что позволяет избежать перестройки лазера на новый контур при дрейфе в сторону максимума усиления.

4. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приложение поперечного магнитного поля изменяет перераспределение интенсивностей модовых составляющих лазерного излучения, а также приводит к устранению зон нестабильной поляризации АЧХ. Однако в случае, когда к активному элементу приложен лишь один магнит, растёт продольная составляющая магнитного поля, вследствие чего помимо перераспределения интенсивностей мод резонатора происходит перераспределение ширины каждого из контуров. Данный эффект можно использовать для улучшения стабилизации лазера по уровню мощности ввиду возможности стабилизации вдали от краёв АЧХ, что приведёт к устранению одновременного существования двухмодового режима генерации и, как следствие этого — увеличению длины временной когерентности.

Для стабилизации этого сигнала была разработана цифровая система АПЧ (автоподстройки частоты).

Функционирование системы автоподстройки частоты, входящей в состав лазера, осуществлялось следующим образом.

Аналитическая часть программы микроконтроллера непрерывно сравнивала поступающий с выхода АЦП сигнал с заранее установленной константой. В случае превышения мощностью значения константы подавалась команда на включение нагревателя активного элемента, что вызывало увеличение длины резонатора за счёт термического расширения корпуса. Это в свою очередь приводило к уменьшению выходной мощности за счёт перемещения по доплеровскому контуру усиления. Выбранный падающий участок зависимости мощности от длины резонатора обеспечивал более устойчивую стабилизацию мощности по сравнению с возрастающим. При уменьшении выходной мощности ниже величины, задаваемой константой, нагреватель выключался, и корпус активного элемента, остывая за счёт естественного охлаждения, возвращался к стабилизируемому размеру. Оценочная величина температуры активного элемента на участке стабилизации составляла 45–70 °С в зависимости от температуры окружающего воздуха.

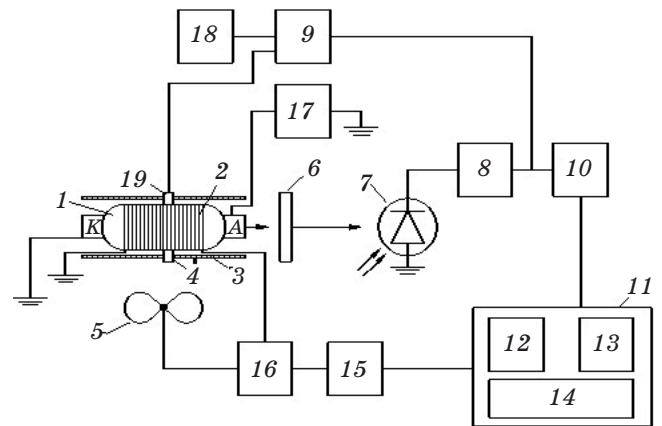


Рис. 5. Конструкция разработанного лазера. 1 — активный элемент длиной $L = 135$ мм, 2 — нагревательный элемент, 3 — корпус излучателя, 4 — магнитная система, 5 — системы принудительного воздушного охлаждения, 6 — поляризационная плёнка, 7 — фотодиод, 8 — усилитель сигнала фотоприёмника, 9 — система измерения разницы температур, 10 — аналогово-цифровой преобразователь, 11 — микроконтроллер, 12 — блок ПИД-регулирования, 13 — блок управления переходом режимов работы, 14 — блок измерения опорного уровня, 15 — цифро-аналоговый преобразователь, 16 — усилитель мощности управляющего сигнала, 17 — высоковольтный блок питания, 18, 19 — термосопротивления.

Система тестировалась при температурах окружающего воздуха 20 и 29 °С и сохраняла работоспособность в течение 8 часов.

Когерентность лазера определялась по технической ширине линии, которая в свою очередь измерялась на установке измерения нестабильности оптической частоты. При максимальных улодах частоты $\Delta\nu = 50$ МГц длина когерентности определялась по формуле $L_{\text{coh}} = c/\Delta\nu$, где c — скорость света и $\Delta\nu$ — нестабильность оптической частоты [13, 14], и составляла не менее 3 м.

Нестабильность оптической частоты за 4 ч непрерывной работы была около 10^{-8} отн. ед., нестабильность мощности лазерного излучения за 4 ч непрерывной работы — 0,66%, выходная средняя мощность лазерного излучения — 0,95 мВт (одночастотный спектральный состав).

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.plasmalabs.ru/> (Реклама АО «ПЛАЗМА» г.Рязань)
2. Дятлов М.К., Касьян В.Г. Поляризация излучения гелий-кадмиего ОКГ в поперечном магнитном поле // Электронная техника. Электрорадиодетали и газоразрядные приборы. 1968. Вып. 6. С. 24–26.
3. Войтович А.П. Магнитооптика газовых лазеров. Минск: Наука и техника, 1984. 208 с.
4. Лэмб У. Теория оптических лазеров / Квантовая оптика и квантовая радиофизика. М.: Изд-во «Мир», 1965. 452 с.
5. Привалов В.Е. Газоразрядные лазеры в судовых измерительных комплексах. Л.: Судостроение, 1977. 151 с.
6. Гуделев В.Г., Журик Ю.П., Измайлов А.Ч., Ясинский В.М. Эффект автостабилизации интенсивности излучения двухчастотного газового лазера // Квантовая электроника. 1990. Т. 17. № 10. С. 1285–1291.
7. Гуделев В.Г., Ясинский В.М. Двухчастотный гелий-неоновый лазер в поперечном магнитном поле // Квантовая электроника. 1982. Т. 9. № 7. С. 1420–1428.
8. Гончуков С.А., Ермаченко В.М., Измайлов А.Ч., Касумова Р.Д., Петровский В.Н., Рурукин А.Н. Газовый лазер с фазовой анизотропией в постоянном магнитном поле // Квантовая электроника. 1981. Т. 8. № 2. С. 333–340.
9. Гуделев В.Г., Журик Ю.П., Измайлов А.Ч., Ясинский В.М. Динамика генерации двухчастотного газоразрядного лазера в режиме автостабилизации интенсивности излучения // Квантовая электроника. 1995. Т. 33. № 9. С. 878–882.
10. Зоркин В.С., Чуляева Е.Г., Степура А.В. Исследование влияния магнитных полей на двухчастотный активный элемент He-Ne лазера // Сборник трудов II МНТК и МНМК «СТНО-2018». Т. 2. Рязань: РГРТУ, 2018. С. 54–59.
11. Зоркин В.С., Власов А.Н., Бодров А.И., Чуляева Е.Г., Паюров А.Я., Кюн В.В. Способы управления формой амплитудно-частотной характеристики He-Ne лазера с целью стабилизации его параметров // Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте: труды XXIV международного науч. конф. Новороссийск: ГМУ имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, 2018. С. 14–15.
12. <http://zapadpribor.com/sh1-8/> Описание измерителя магнитной индукции Ш1-8
13. Долгих Г.И., Привалов В.Е. Лазерная физика. Фундаментальные и прикладные исследования. Владивосток: ООО «Рэя», 2016. 352 с.
14. Бутиков В.И. Оптика. М.: Высш. шк., 1986. 512 с.