

УДК 621.378.385

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ МНОГОМОДОВОГО ЛИНЕЙНОГО ЗЕЕМАНОВСКОГО ЛАЗЕРА

M. O. Никончук, И. П. Пугач

Экспериментально исследован многомодовый линейный гелий-неоновый лазер на длине волны 3,39 мкм, находящийся в продольном магнитном поле. Получен режим синхронизации эллиптически-поляризованных продольных мод лазера путем модуляции потерь резонатора на частоте межмодовых биений. Модуляция осуществлялась при помощи акустооптического модулятора из германия. Изучен спектр излучения лазера, исследованы частотные и поляризационные характеристики. Проведено сравнение экспериментальных данных для режимов синхронизации и свободной генерации, а также объяснены полученные эффекты.

Исследованию характеристик двухчастотных лазеров посвящен ряд работ [1, 2]. В этих исследованиях межмодовое расстояние резонатора было больше ширины линии усиления и, следовательно, в генерацию входили лишь две ортогонально-поляризованные моды с одним продольным индексом q (число полуволн, укладывающихся на длине резонатора). Многочастотный режим изучен гораздо слабее, хотя имеет некоторые преимущества перед одночастотным [3]. В данной работе экспериментально исследуется многочастотный гелий-неоновый лазер на длине волны 3,39 мкм, активная среда которого помещалась в аксиальное магнитное поле. Наложение магнитного поля приводило к расщеплению каждой продольной моды на две с ортогональными круговыми поляризациями. В таком режиме осуществлялась модуляция потерь резонатора на частоте биений продольных мод, что приводило к фазовой синхронизации мод исследуемого лазера.

Исследования проводились на экспериментальной установке, показанной на рис. 1. В качестве активной среды использовалась газоразрядная трубка от стандартного лазера ЛГ-75. На активную среду накладывалось продольное магнитное поле H . Для обеспечения изотропности резонатора с обоих концов трубы помещены две плоскопараллельные кварцевые пластины P_1 и P_2 , плоскости падения которых были развернуты на угол 90° по отношению к плоскости падения света на герметизирующие окна Брюстера газоразрядной трубы. Угол падения света на пластину P_1 равен углу Брюстера. Угол падения света θ на другую пластину мог изменяться в широких пределах для осуществления регулировки амплитудной анизотропии резонатора. Длина резонатора $L=1,8$ м. Потери резонатора за один обход составляют величину 0,985. Зеркало Z_1 установлено на пьезокерамическом элементе для небольших изменений длины резонатора.

Синхронизация продольных мод осуществлялась с помощью акустооптического германиевого модулятора. Модулятор располагался под углом 18° к оси резонатора для исключения интерференционных явлений при отражении излучения от его торцов.

Для анализа характеристик излучения лазера проводились исследования межмодовых биений, поляризации и спектра излучения. Ис-

пользуемый сканирующий интерферометр содержал между зеркалами активную усиливающую среду с наложенным на нее продольным неоднородным магнитным полем. Неоднородное магнитное поле уширяет линию усиления и, следовательно, уменьшает коэффициент усиления. Причем величина поля подбирается такой, чтобы усиление было несколько меньше уровня потерь в интерферометре. Введение активной среды увеличивало добротность сканирующего интерферометра, и одновременно повышалась его разрешающая способность для длины волны 3,39 мкм.

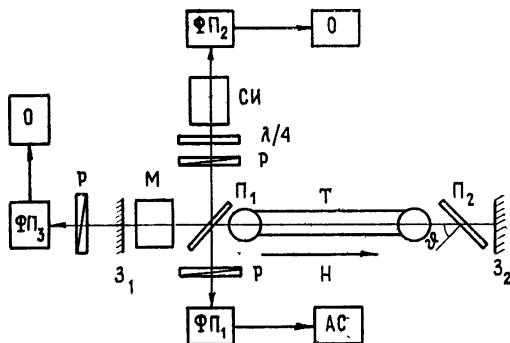


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

z_1, z_2 — зеркала резонатора,
 T — газоразрядная трубка, Π_1, Π_2 — плоскопараллельные пластины,
 M — модулятор, P — поляризатор,
 $\lambda/4$ — четвертьволновая пластина,
 SI — сканирующий интерферометр,
 $\Phi\Pi_1, \Phi\Pi_2, \Phi\Pi_3$ — фотоприемники
 O — осциллограф, AC — анализатор спектра.

В режиме свободной генерации (РСГ) при отсутствии магнитного поля в области активной среды лазер генерировал одну-две линейнополяризованные продольные моды. Поляризация излучения определялась остаточной амплитудной анизотропией резонатора. При наложении магнитного поля поляризация становилась эллиптической и появлялось частотное расщепление между различно поляризованными модами E_q^+ и E_q^- (индексы «+» и «-» обозначают моды, имеющие соответственно круговую поляризацию правого и левого направлений вращения).

Спектр излучения лазера в РСГ (рис. 2а, б) содержал либо по одной моде каждой поляризации (рис. 2а), либо две моды (рис. 2б) в зависимости отстройки частоты мод относительно центра линии усиления. При этом одновременное существование двух соседних продольных мод одной поляризации возможно пристройке средней частоты мод от центра линии усиления на ± 15 МГц. Межмодовые биения лазера в РСГ (рис. 3а) нестабильны и существуют только при наличии двух мод (рис. 2б). Частота этих биений около 65 МГц.

Биения между ортогонально-поляризованными модами носят шумовой характер и появляются лишь при определенных настройках длины резонатора. Расщепление начинается при $H=4$ Э (рис. 5) или позже при $H=14$ Э в зависимости от угла ϑ . Зависимость частоты биений мод от магнитного поля носит примерно линейный характер. Сигнал на частоте биений пропадает при $H=33 \div 38$ Э, причем одновременно возможно появление биений, частота которых больше на межмодовый интервал (65 МГц) и зависит от магнитного поля. Наличие сигнала на частоте — «межмодовый интервал плюс частота биений» — также зависит отстройки частоты генерации относительно линии усиления. Поляризация излучения в РСГ была близка к циркулярной в небольших магнитных полях, при увеличении поля становилась круговой и далее не изменялась (рис. 6).

Линия усиления неона на длине волны 3,39 мкм является однородно-уширенной, поэтому в РСГ возбуждается только по одной моде каж-

дой поляризации из-за конкуренции между продольными модами совпадающих поляризаций в своей линии усиления (рис. 2а). Генерируются моды, находящиеся в условиях наибольшего усиления, т. е. вблизи центра линии усиления. Только в узком диапазоне расстроек частоты генерации, где моды одинаковой поляризации симметричны по отношению к центру своей линии усиления и имеют одинаковые условия возбуждения, существует область совместной генерации двух соседних продольных мод (рис. 2б). При расстоянии между продольными модами 65 МГц область совместной генерации двух мод (E_q^+ и E_{q+1}^+ или E_q^- и E_{q+1}^-) составляла величину порядка 30 МГц. Такое же поведение соседних мод исследовано в работе [2] для двух мод, имеющих линейные ортогональные поляризации.

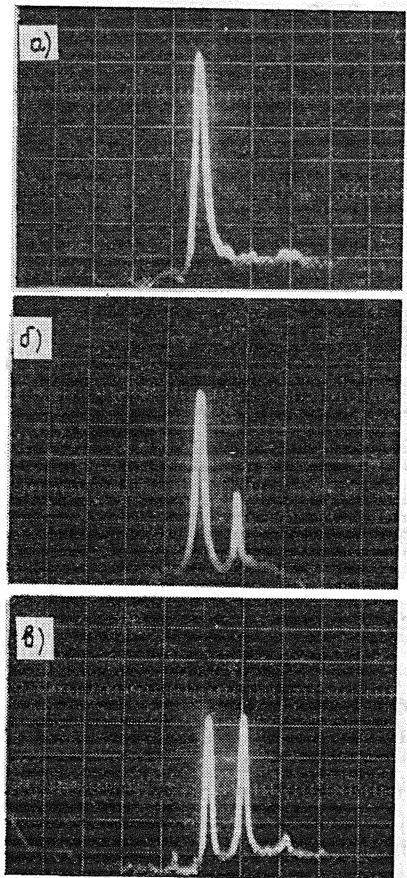


Рис. 2.

Рис. 2. Спектр излучения лазера: а), б) РСГ, в) РСМ.

Рис. 3. Спектр межмодовых биений: а) РСГ, б) РСМ.

Рис. 4. Спектр биений ортогонально- и одинаково-поляризованных мод в РСМ.

Частота биений продольных мод (65 МГц) сильно отличается от межмодового интервала пустого резонатора (83 МГц). Это связывается с сильным линейным затягиванием мод к центру линии усиления, обусловленным высоким коэффициентом усиления активной среды на длине волны 3,39 мкм [4]. Кроме того, оптическая длина резонатора увеличивалась за счет наличия в нем четырех кварцевых пластин и германиевого модулятора длиной 2 см. Сигнал на частоте биений про-

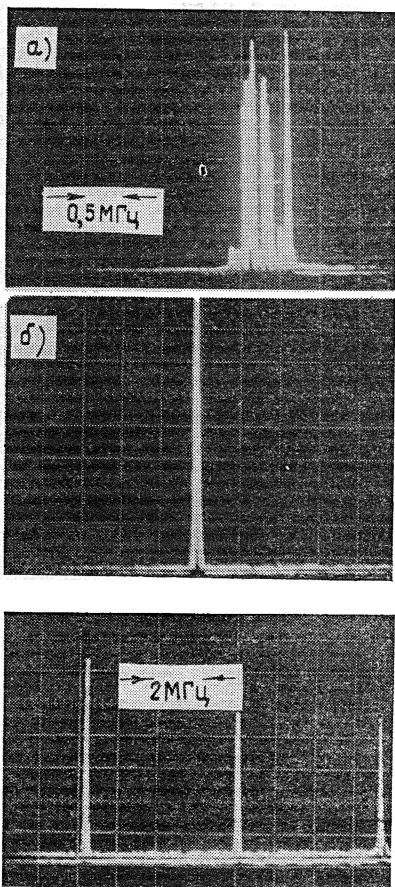


Рис. 3, 4.

дольных мод нестабилен (рис. 3а) и занимает полосу частот около 1 МГц , что характерно для биений двух несинхронизованных мод. Наличие нескольких спектральных составляющих связывается с тем, что за время регистрации спектра биений частота биений изменялась. Заметим, что эти биения существуют только в узкой области расстроек частоты генерации, где моды E_q^+ и E_{q+1}^+ (или E_q^- и E_{q+1}^-) симметричны относительно центра линии усиления (рис. 2б).

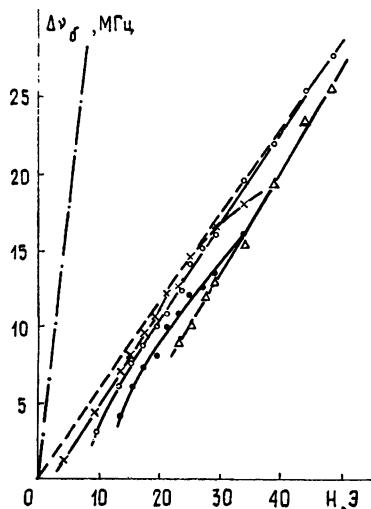


Рис. 5.

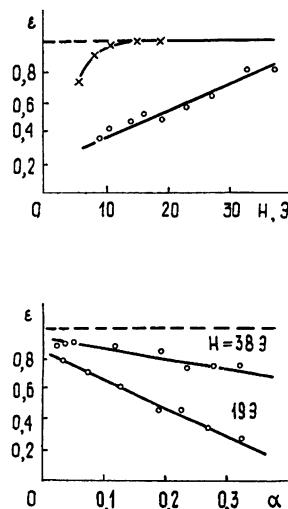


Рис. 6, 7.

Рис. 5. Зависимости частоты биений ортогонально-поляризованных мод от магнитного поля;
крестики — РСГ, $\vartheta=68^\circ$; светлые кружки — РСМ, $\vartheta=68^\circ$; темные кружки — РСГ,
 $\vartheta=0^\circ$; треугольники — РСМ, $\vartheta=0^\circ$, штриховая — расчетная зависимость расщепления
линий усиления.

Рис. 6. Зависимость эллиптичности поляризации мод от магнитного поля;
крестики — РСГ, светлые кружки — РСМ.

Рис. 7. Зависимость эллиптичности поляризации мод от глубины модуляции.

Наличие биений отрогонально-поляризованных мод также зависит от величины расстройки, что связано с конкуренцией соседних продольных мод. Однако в этом случае биения появляются, когда моды каждой из поляризаций находятся вблизи центров своих линий усиления (рис. 2а). При изменении расстройки в линию усиления перемещается соседняя продольная мода (E_{q+1}^+ или E_{q-1}^-). Эта мода попадает в условия большего усиления и подавляет генерирующую моду (E_q^+ или E_q^-). Вследствие этого биения между модами E_q^+ и E_q^- пропадают. При этом возникают биения между модами E_{q+1}^+ и E_q^- . Частота этих биений имеет «подставку», равную межмодовому интервалу.

Увеличение магнитного поля приводит к расщеплению линии усиления, что эквивалентно смещению мод каждой поляризации относительно центра своей линии усиления, если при этом моды E_q^+ и E_q^- находятся симметрично относительно центра нерасщепленной линии усиления. При этом область расстроек частоты генерации, где одновременно существуют E_q^+ - и E_q^- -моды, уменьшается до нуля при увеличении магнитного поля. Соответственно увеличивается область совместной генерации E_{q+1}^+ - и E_q^- -мод.

Таким образом, при полях $H < 20 \text{ Э}$ наиболее устойчивы биения мод E_q^+ и E_q^- . Частота биений этих мод $\Delta\nu_b$ примерно линейно увеличивается с увеличением магнитного поля (рис. 5). При полях

$H > 38$ Э информация о частоте биений заложена в разности частот мод с различным продольным индексом E_{q+1}^+ и E_q^- , находящихся вблизи центра своей линии усиления:

$$\Delta\nu = c/2L + \Delta\nu_b.$$

При 20 Э $< H < 38$ Э в зависимости от расстройки возможно, как следует из экспериментов, существование биений ортогонально-поляризованных мод, имеющих как одинаковое значение q , так и отличающееся на единицу.

Исходя из полученных экспериментальных данных и приведенных рассуждений, ясно, что при дальнейшем увеличении магнитного поля в генерацию будут входить моды, индекс q которых отличается на две и более единиц: E_{q+1}^+ и E_{q-1}^- , E_{q+2}^+ и E_{q-2}^- и т. д. Таким образом, в РСГ частоту биений ортогонально-поляризованных мод можно определять из кусочно-непрерывной зависимости: $\Delta\nu = nc/2L + \Delta\nu_b$, где $n = 0, 1, \dots$ — разность между индексами q для генерируемых мод. Причем, если ортогонально-поляризованные моды одинакового продольного индекса симметричны относительно центра нерасщепленной линии усиления, то n четно. Если же симметричны моды с различными индексами q , то n нечетно.

Характер изменения поляризации излучения в зависимости от магнитного поля (рис. 6) совпадает с аналогичной характеристикой для одномодовых лазеров [1].

Режим синхронизации мод (PCM) осуществлялся при модуляции излучения на частоте межмодовых биений и глубине модуляции от 0,02 до 0,5. Для изучения характеристик лазера устанавливалась глубина модуляции 0,2. Спектр излучения в этом режиме содержит четыре-пять мод каждой поляризации (рис. 2в). Количество мод зависит от расстройки средней частоты генерации относительно линии усиления. Спектр межмодовых биений в PCM (рис. 3б) устойчив по отношению к изменению параметров лазера, а частота биений совпадает с частотой модуляции. Также возникают устойчивые биения ортогонально-поляризованных мод (рис. 4). Центральная метка на этой осциллограмме соответствует частоте биений мод одинаковых поляризаций — 65 МГц. Две крайние метки сдвинуты по частоте на величину частоты биений ортогонально-поляризованных мод. Частоты боковых составляющих спектра равны 58,5 МГц и 71,5 МГц.

Биения между ортогонально-поляризованными модами в PCM начинаются при больших значениях магнитного поля в отличие от режима свободной генерации (рис. 5). При значениях $\Phi = 0$ как в PCM, так и в РСГ биения возникают также при больших величинах поля, нежели при $\Phi = 68^\circ$. В синхронном режиме биения стабильны и существуют при всех достижимых магнитных полях (до $H = 100$ Э). При этом значения частоты биений приближаются к асимптоте, показанной штриховой линией (рис. 5). Поляризация излучения эллиптическая, а отношение полуосей эллипса медленно приближается к единице при увеличении магнитного поля (рис. 6).

Была изучена зависимость эллиптичности от глубины модуляции (рис. 7). Видно, что при $H = 38$ Э эллиптичность слабее зависит от глубины модуляции, чем при $H = 19$ Э. Аналогично при увеличении глубины модуляции уменьшается и частота биений на величину 100—200 кГц, однако из-за различного рода нестабильностей не удалось количественно исследовать эту зависимость.

В PCM происходит перекачка энергии из моды, наиболее близкой к центру линии усиления, к соседним продольным модам, которые начинают генерировать и образуют эквидистантный спектр (рис. 2в,

рис. 3б). На осциллограмме видно, что крайние моды существенно меньше по величине, чем центральные. Необходимо отметить, что амплитуды мод имеют максимальную величину, если сканирующий интерферометр наиболее близок к самовозбуждению, что подбиралось величиной магнитного поля, накладываемого на активную среду интерферометра. Сигнал от исследуемого лазера, попадающий в интерферометр, приводил к регенерации. Причем наибольшей была амплитуда тех мод, для которых легче выполняются условия регенерации, т. е. вблизи центра линии усиления активной среды интерферометра. Этим и объясняется малая амплитуда крайних мод на рис. 2в. Частота биений ортогонально-поляризованных мод, при которых снимались осциллограммы, равнялась 6,5 МГц. Такие частоты не разрешались используемым интерферометром, и поэтому вместо восьми мод видны только четыре (две соседние моды E_q^+ и E_q^- сливаются в одну).

Осциллограммы на рис. 3б и рис. 4 иллюстрируют наличие соседних продольных мод, имеющих одинаковые и ортогональные поляризации. При частоте биений мод E_q^+ и E_q^- , равной 6,5 МГц, биения мод E_{q-1}^+ и E_q^- происходят на частоте 58,5 МГц, а биения мод E_q^+ и E_{q-1}^- — на частоте 71,5 МГц.

В РСМ биения начинались с частоты 3 МГц (рис. 5) и существовали при всех расстройках частоты генерации. Увеличение амплитудной анизотропии резонатора (путем уменьшения Φ) приводит к уменьшению эллиптичности поляризации и, следовательно, к уменьшению величины линейного затягивания частот к центрам линий усиления. При этом уменьшается частота биений при фиксированном значении магнитного поля. Из рис. 5 видно, что характер зависимости одинаков для режимов синхронизации и свободной генерации. При положении пластины P_2 под углом 68° происходит наилучшая компенсация амплитудной анизотропии резонатора (зависимость частоты биений от магнитного поля проходит наиболее близко к асимптоте), и в этом случае для РСМ вид зависимости совпадает с аналогичной зависимостью для одномодового лазера [4].

Уменьшение частоты биений и эллиптичности поляризации (рис. 6) в режиме синхронизации объясняется анизотропным характером модуляции. Для модулятора характерна различная глубина модуляции для ортогональных линейных поляризаций, имеющих направление вдоль (глубина модуляции α_{\parallel}) и поперек (α_{\perp}) акустической волны. Измерено отношение $\alpha_{\parallel}/\alpha_{\perp} = 2,3$ для одного прохода излучения через модулятор. В РСМ излучение представляет собой последовательность импульсов, которые проходят через модулятор в момент наименьших потерь (для центра полосы синхронизации). Однако импульсы имеют определенную длительность, которая в наших экспериментах составляет порядка 5 нс и оказывается сравнимой с периодом модуляции, равным 15 нс. Поэтому модуляция сильно воздействовала на импульс, что и видно на эксперименте. Учитывая это, необходимо заметить, что должна меняться эллиптичность поляризации в самом импульсе, т. е. две проекции на декартовы оси координат должны иметь различные длительности. Регистрировать сам импульс не было возможности из-за недостаточно широкой полосы используемого высокочастотного фотоприемника.

Эллиптичность поляризации уменьшается при увеличении глубины модуляции $\alpha = (\alpha_{\parallel} + \alpha_{\perp})/2$, так как увеличивается разность между значениями глубины модуляции α_{\parallel} и α_{\perp} для ортогональных направлений. Анизотропией модуляции объясняется также и то, что в РСМ расщепление начинается с 3 МГц, т. е. позже, чем в РСГ 1,5 МГц (см. рис. 5). Такое же значение минимального расщепления (3 МГц) можно получить и для РСГ, если повернуть пластину P_2 на соответствующий угол.

Следовательно, для конкретного значения a анизотропию модуляции можно представлять частичным поляризатором.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования характеристик излучения линейного гелий-неонового лазера в режиме свободной генерации и в режиме синхронизации эллиптически-поляризованных продольных мод позволяют сделать следующие выводы:

1) Расщепление частот мод с противоположными знаками эллиптическостей (путем наложения продольного магнитного поля на активную среду лазера) в режиме синхронизации продольных мод осуществляется по всей линии усиления активной среды лазера. В режиме свободной генерации такое расщепление частот существует только при небольших расстройках частоты генерации относительно центра нерасщепленной линии усиления.

2) В режиме синхронизации мод изменением величины магнитного поля можно производить расщепление частот мод с противоположными знаками эллиптическостей в широких пределах, вплоть до частоты биений продольных мод. В режиме свободной генерации величина этого расщепления ограничивается сверху эффектами конкуренции расщепленных компонент одной продольной моды с соседними продольными модами той же поляризации, попадающими при увеличении расщепления линии усиления активной среды в условия большего усиления.

3) При использовании анизотропного модулятора эллиптичность расщепленных мод уменьшается при увеличении глубины модуляции с одновременным уменьшением частоты расщепления мод из-за внесения различных потерь для составляющих поляризации излучения, направленных вдоль и поперек направления распространения акустической волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ладыгин М. В., Царьков В. А.—Опт. и спектр., 1971, 30, № 1, с. 133.
2. Губин М. А., Попов А. И., Проценко Е. Д.—Квантовая электроника, 1971, № 4, с. 34.
3. Петрунькин В. Ю., Николаев В. М., Галкин С. Л.—ЖТФ, 1975, 45, № 6, с. 1234.
4. Косинский Ю. И., Никончук М. О., Пугач И. П.—Вестник Киевского ун-та, Физика, 1982, № 23, с. 72.

Киевский государственный
университет

Поступила в редакцию
7 декабря 1981 г.,
после доработки
9 июля 1982 г.

CHARACTERISTICS OF RADIATION OF MULTIMODE LINEAR ZEEMAN LASER

M. O. Nikonchuk, I. P. Pugach

A multimode linear He-Ne laser at the wavelength 3.39 mkm being in a longitudinal magnetic field is experimentally investigated. A regime has been obtained for synchronization of elliptically polarized longitudinal modes of the laser by modulation of the resonator losses at the frequency of intermode beatings. The modulation has been made by the acousto-optical germanium modulator. The spectrum of the laser radiation has been studied and the frequency and polarization characteristics have been investigated. A comparison is made between experimental data for the synchronization regimes and a free generation as well as the effects obtained are explained.