

Александр Андреевич ГАРМОНОВ¹
Владимир Петрович ДУБОВ²
Антон Юрьевич ПОТОЦКИЙ³

УДК 621.373.8

ЭВОЛЮЦИЯ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ И ПОЛЯРИЗАЦИИ МОД ПРИ УСТАНОВЛЕНИИ СТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА В ДВУХМОДОВЫХ ГЕЛИЙ-НЕОНОВЫХ ЛАЗЕРАХ

¹ старший преподаватель кафедры
экспериментальной физики и нанотехнологий,
Тюменский государственный университет
gamma125@mail.ru

² кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры радиофизики,
Тюменский государственный университет
duboff@mail.ru

³ аспирант кафедры радиофизики,
Тюменский государственный университет
ponab@yandex.ru

Аннотация

Гелий-неоновые лазеры различных типов являются весьма распространенными и применяются в самых различных областях и отраслях хозяйственной и научной деятельности. Цель настоящей работы состояла в изучении эволюции выходной мощности и некоторых других параметров лазеров при установлении рабочего теплового режима. В статье представлена первая часть материалов изучения поведения некоторых параметров маломощных гелий-неоновых двухмодовых лазеров в процессе установления стационарного теплового режима. Изучена работа нескольких экземпляров таких ла-

Цитирование: Гармонов А. А. Эволюция выходной мощности и поляризации мод при установлении стационарного теплового режима в двухмодовых гелий-неоновых лазерах / А. А. Гармонов, В. П. Дубов, А. Ю. Потоцкий // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2016. Том 2. № 3. С. 94-106.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-3-94-106

зеров (от 3 до 6 в зависимости от экспериментов). Предпринята попытка разобраться в причинах эволюции и флуктуаций выходной мощности лазеров, мощности отдельных продольных мод и изменения их поляризации в первые 10-30 мин после начала работы лазеров, когда тепловое расширение основных элементов лазеров приводит к заметному изменению их параметров. Описаны эксперименты и оптические схемы установок с применением поляризационных и интерференционных приборов, таких как призма Волластона, интерферометр Фабри–Перо и некоторые другие оригинальные устройства.

В настоящей экспериментальной работе изучались выходные характеристики нескольких экземпляров гелий-неоновых двухмодовых лазеров типа ЛГН-207А, ЛГН-207Б мощностью от 1 до 2,2 мВт, излучение которых не обладает четко выраженной поляризацией. Даже при такой малой выборке показано, что: а) поведение излучения различных экземпляров этих лазеров в первые 30 мин заметно отличается друг от друга; б) существуют лазеры, в которых «перескоки» мод минимальны или отсутствуют; в) при даже малом электрическом пробое в трубке или блоке питания поляризационные характеристики лазеров приобретают хаотический характер.

Мы надеемся, что результаты работы позволят экспериментаторам и конструкторам более уверенно производить отбор лазерной техники для комплектования измерительных и исследовательских приборных комплексов.

Ключевые слова

Мощность, нагрев, резонатор, мода, поляризация.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-3-94-106

Введение

Понимание причин, приводящих к флуктуации выходной мощности и поляризации продольных мод в лазерах при их прогреве после включения крайне важно для спектральных и поляризационных исследований, а также для изучения взаимодействия лазерного излучения с веществом. Не будет преувеличением сказать, что гелий-неоновые лазеры различных типов являются наиболее распространенными и применяются в самых различных областях и отраслях хозяйственной и научной деятельности. И некоторые из этих применений требуют знаний о состоянии поляризации излучения, например, для селекции продольных мод, для стабилизации частоты лазерного излучения [4; 6], лазерных интерферометров [3], оптических стандартов частоты [1], приборных комплексов для точного измерения [2] и др.

Поскольку в статье пойдет речь о маломощных двухмодовых He-Ne лазерах, то кратко остановимся на ассортименте промышленных лазеров этого типа. До конца прошлого столетия на территории бывшего СССР неплохие двухмодовые He-Ne лазеры выпускались во Львове на заводе «Полярон». Одними из последних изделий из этой серии были лазеры марки ЛГН-207А, ЛГН-207Б, ЛГН-208А, ЛГН-208Б. Лазеры ЛГН-207А и ЛГН-207Б оборудованы разрядными трубками с окнами Брюстера и генерируют линейно поляризованное излучение, а лазеры типа ЛГН-208А и ЛГН-208Б имеют трубки с прямыми торцами

и генерируют неполяризованное или, используя терминологию [7; 9], случайно поляризованное излучение. Эти лазеры до сих пор широко распространены, продаются на территории России и ближнего зарубежья и используются в аналитической аппаратуре. В настоящее время аналогичная продукция выпускается Рязанским заводом «Плазма». Это лазеры типа ГН-2П, ГН-2П-1, ГН-3 и ГН-3-1, которые тоже попадают в сферу нашего интереса.

Выпускаемые лазеры стандартизованы по таким техническим параметрам, как выходная мощность, длина волны, угол расходимости и др. Состояние поляризации отдельных мод изготовителем не регламентируется. В некоторых случаях неконтролируемые скачкообразные изменения этих состояний приводит к сбою в работе измерительных комплексов, в состав которых входят обсуждаемые здесь лазеры [6: 2]. Поэтому понимание конкретного поведения уровня выходной мощности лазера, состояния продольных мод и их поляризации в первое время после включения лазера и на протяжении всего рабочего цикла лазера является важным.

Часто пользователи не обращают внимания на такую характеристику (которая также должна указываться в техническом описании), как время готовности лазера к работе. А это время не маленькое. Для маломощных лазеров типа ЛГН-207 оно составляет 30 мин. В этот интервал времени происходит постепенно замедляющийся разогрев лазерной трубки и всего лазера, включая держатели зеркал. Это, по сути, переходной процесс, во время которого изменяется длина резонатора, модовый состав, выходная мощность и поляризация продольных мод. Именно в ходе этого сравнительно быстрого на начальной стадии процесса можно проследить за возможными изменениями в состоянии отдельных продольных мод. Важность изучения поведения мод на начальной стадии работы лазера заключается еще и в том, что в течение последующей работы эти процессы также могут происходить, создавая нештатные ситуации. В этом смысле желательно выяснить, как оценить качество лазеров в отношении тех параметров, которые не контролируются при его изготовлении, но важны при его использовании.

Для изучения меняющихся в ходе прогрева лазеров параметров мы использовали несколько сравнительно простых экспериментальных возможностей, которые будут описаны ниже. В качестве объектов исследования было взято несколько He-Ne лазеров типа ЛГН-207, ЛГН-208 и ГН-2П-1.

На Рис. 1 приведены кривые изменения мощности лазеров с момента включения до истечения примерно получаса. Зависимости сняты при помощи измерителя мощности лазеров Nova фирмы Ophir и цифрового осциллографа фирмы Velleman в режиме самописца. На всех графиках неполяризованных лазеров (кроме б) видны характерные квазипериодические (с увеличивающимся периодом) изменения выходной мощности с амплитудой до 5% от среднего значения. Периоды этих изменений возрастают от единиц до нескольких десятков секунд в разном для разных лазеров темпе, а амплитуда остается практически неизменной на протяжении всего времени наблюдения. Причины и особенности такого поведения мощности обсуждаются далее.

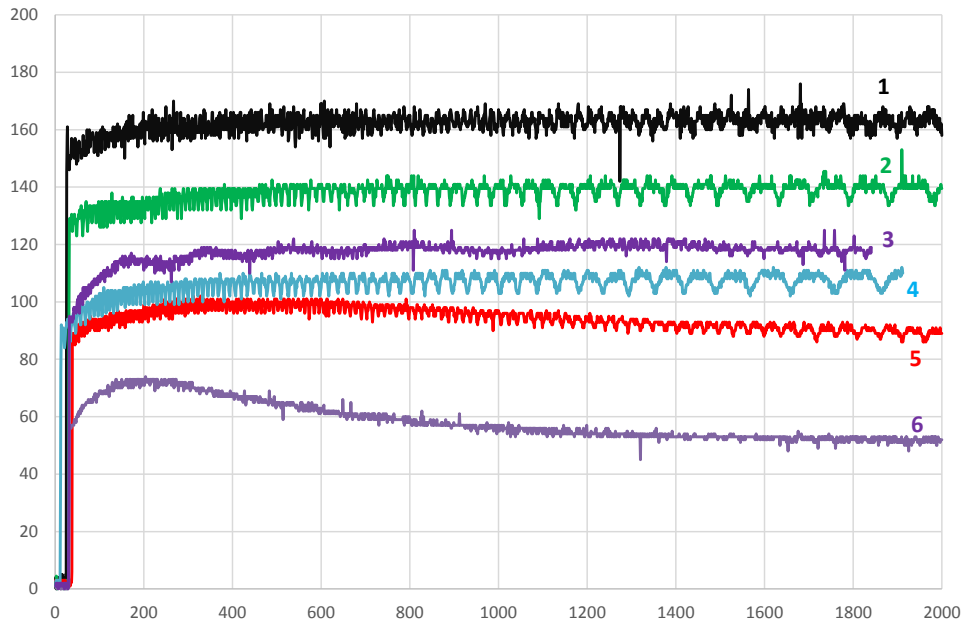


Рис. 1. Зависимость выходной мощности лазеров (в произвольных единицах) от времени (в секундах).
1 — поляризованный лазер ЛГН-208;
3 — поляризованный лазер ГН-2П-1;
2, 4, 5, 6 — неполяризованные лазеры ЛГН-207

Fig. 1. Dependence of laser output power (in arbitrary units) against time (in seconds):
1 — polarized laser LGN-208;
3 — polarized laser GN-2P-1;
2, 4, 5, 6 — unpolarized lasers LGN-207

Лазеры с поляризованным излучением тоже демонстрируют некоторое увеличение характерного времени флуктуаций выходной мощности, но эти флуктуации все же существенно более хаотичны. Лазер 6, который не демонстрирует квазипериодичности вообще, по-видимому, не вполне исправен. По крайней мере, его выходная мощность заметно ниже паспортных значений.

1. Наблюдение эволюции амплитуды продольных мод двухмодовых неполяризованных He-Ne лазеров с использованием призмы Волластона

Из многих источников, например, [3: 15; 5; 9: 4] следует, что спектр неполяризованного гелий-неонового лазера состоит из нескольких продольных мод, которые имеют чередующуюся ортогональную поляризацию. Учитывая это, в первых экспериментах было решено применить призму Волластона.

Призма Волластона пространственно разделяет падающее на нее излучение на два луча с ортогональными поляризациями. Это позволяет определить поляризационный состав излучения лазера и оценить изменения ортогонально поляризованных составляющих этого излучения.

На Рис. 2 представлена схема экспериментальной установки с призмой Волластона, но прежде чем описывать эксперименты введем обозначение, вер-

нее, термин, который облегчит понимание и описание наблюдаемой картины. Как уже неоднократно говорилось, излучение используемых в этой работе лазеров содержит две взаимоортогональные моды. Условимся такое состояние поляризации называть «крестом» (плоскости поляризаций перпендикулярны друг другу). Призму Волластона тоже характеризуют два ортогональных направления, т. е. она имеет свой «крест» пропускания. Поляризатор имеет одно направление пропускания. Взаимная ориентация этих «крестов» и направлений определяет уровень выходного сигнала фотоприемников.

Излучение лазера (1) модулируется обтюратором (2), проходит через призму Волластона (3), которая делит луч на две составляющие с ортогональными поляризациями, и регистрируется фотоприемниками (4), в качестве которых использовались ФЭУ 83. Сигналы с ФЭУ записывались цифровым осциллографом (5) типа RIGOLDS 1054 и обрабатывались на компьютере.

Необходимо отметить, что задача исследования продольных мод лазеров не такая простая как это может показаться на первый взгляд. Многими авторами [6: 2; 7; 9: 3] утверждается, что продольные моды обсуждаемых здесь лазеров имеют ортогональную поляризацию, но схемы разделения продольных мод не приводятся. Да, можно просто разделить луч лазера на две составляющие с ортогональными поляризациями, как это сделано на Рис. 2, но при этом нельзя утверждать, что в каждой составляющей присутствует излучение только одной продольной моды. Это объясняется тем, что, по сути, причина ортогональности поляризаций продольных мод в He-Ne лазерах до конца не выяснена и степень их поляризации в общем случае неизвестна. Очевидно, степень поляризации в основном должна определяться механизмом поляризации, но это, как правило, не обсуждается.

Для решения поставленной задачи требуется реальное разделение продольных мод без воздействия на них поляризационными устройствами. Пока это не сделано, можно говорить лишь о поведении поляризационных составляющих. Полученные с помощью установки с призмой Волластона осциллограммы,

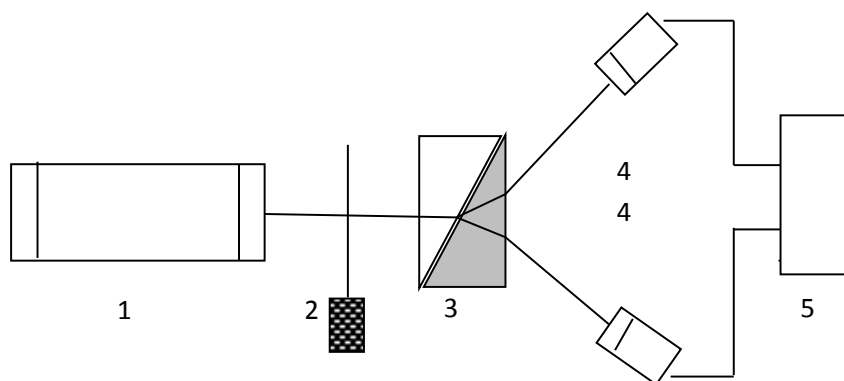


Рис. 2. Экспериментальная установка с призмой Волластона

Fig. 2. Experimental set-up with a Wollaston prism

представленные на Рис. 3, показывают, что амплитуды составляющих излучения с разной поляризацией претерпевают повторяющиеся медленные и скачкообразные изменения, которые можно назвать циклами. По мере прогрева лазера эти повторения циклов замедляются, т. е. каждый последующий цикл занимает времени больше, чем предыдущий.

По осциллограммам видно, что изменения этих составляющих происходят в противофазе: в то время как сигнал от одной «моды» нарастает до максимального значения, сигнал второй «моды» падает до минимального значения и наоборот. Очевидно, что эволюция сигналов связана с перемещением мод по контуру генерации лазера, а резкие перепады амплитуды, скорее всего, объясняются скачкообразным изменением поляризации мод [8]. Моды как бы обмениваются поляризацией. К подобному выводу пришли и в работе [7].

Заметим, что сигналы не уменьшаются до нуля при любом положении призмы Волластона относительно «креста» ортогональных поляризаций продольных мод лазеров. Амплитуда циклических эволюций сигналов, в том числе и скачкообразных, меняется от нуля до максимума в зависимости от угла поворота («креста») призмы Волластона относительно неподвижного лазера.

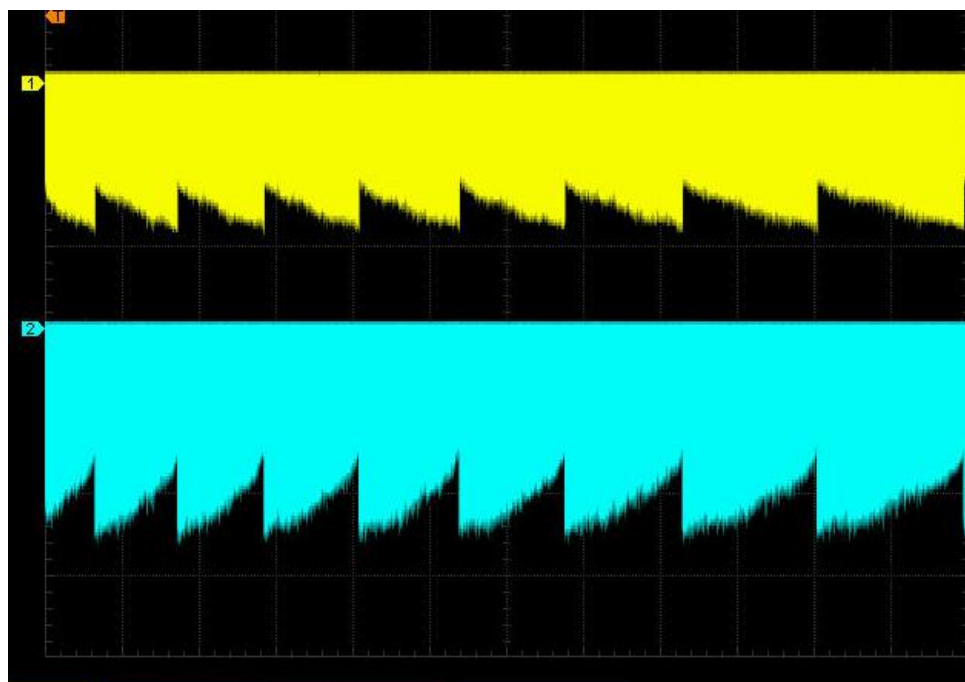


Рис. 3. Осциллограммы сигналов с ортогональными поляризациями после призмы Волластона, полученные в интервал времени с 10 по 20 мин после включения лазера (50 с/дел)

Fig. 3. Signals oscillogrammes with orthogonal polarizations after the Wollaston prism, as received in the time interval of 10 to 20 min after turning on the laser (50 s/div)

В процессе установления стационарного теплового режима длительность циклов, наблюдаемых на осциллограммах, увеличивалась, как это можно видеть на Рис. 4, но даже на интервале 50...60 минут наблюдается, хотя и редко, «перескок» поляризации мод (Рис. 5).

Нужно отметить, что временные зависимости исследуемых лазеров (от 3 до 5 экземпляров в зависимости от типа экспериментов) заметно различались. Описанный выше характер изменений поляризационных составляющих проявлялся у всех лазеров, но с разной амплитудой. У некоторых отсутствовали скачкообразные изменения, у некоторых экземпляров этих изменений было несколько в течение одного цикла. Естественно предположить, что лазеры, излучение которых не испытывает скачкообразных изменений, более подходят для спектральной аналитической аппаратуры, и описанные выше наблюдения необходимо проводить в ходе комплектации измерительных систем.

На Рис. 6 представлена зависимость поляризационных составляющих от времени одного из лазеров ЛГН-207 в интервале 20...30 сек после включения. Перескоки поляризаций отсутствуют, небольшие колебания уровней сигналов не влияют на точность измерительной аппаратуры, использующей подобные лазеры.

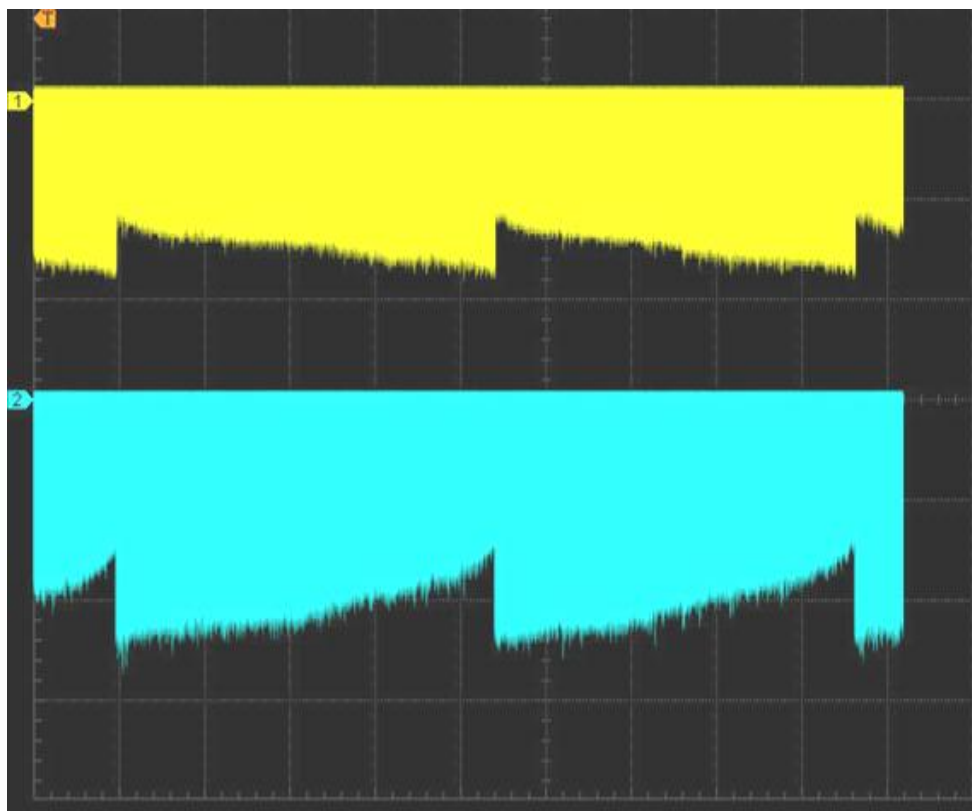


Рис. 4. Осциллограммы сигналов в интервале 20...30 сек (50 с/дел)

Fig. 4. Signals oscillogrammes in the range of 20...30 sec (50 s/div)

2. Наблюдение эволюции амплитуды продольных мод двухмодовых He-Ne лазеров с использованием интерферометра Фабри-Перо (ИФП)

Лазеры типа ЛГН-207 и ЛГН-208 имеют резонатор длиной чуть больше 20 см и соответственно контур генерации, в который попадает две продольные моды.

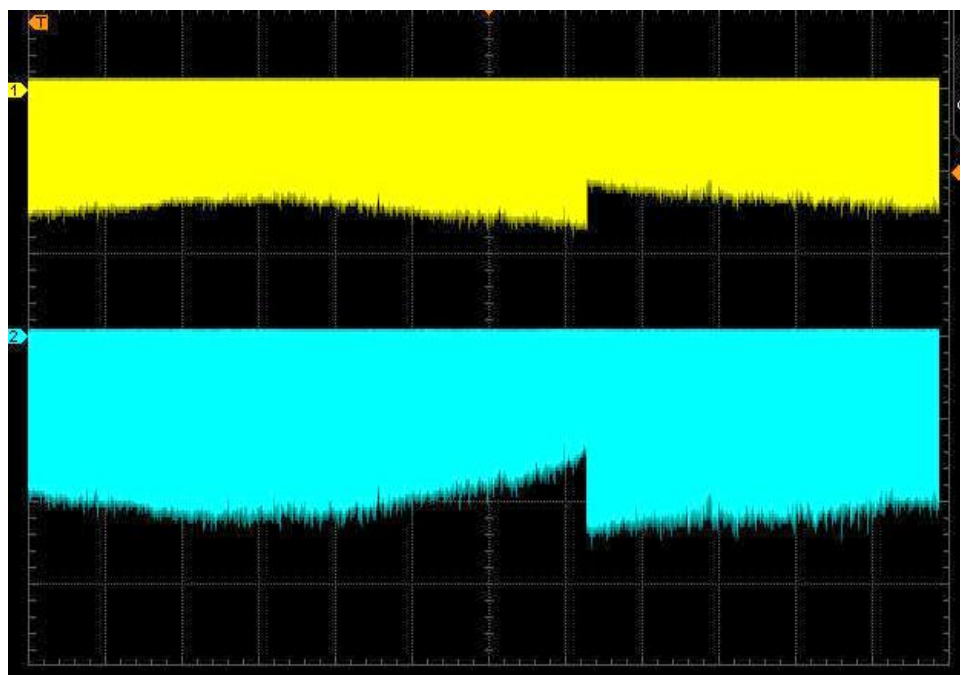


Рис. 5. Осциллограммы сигналов в интервале 50...60 сек (50 с/дел)

Fig. 5. Signals oscillogrammes in the range of 50...60 sec (50 s/div)

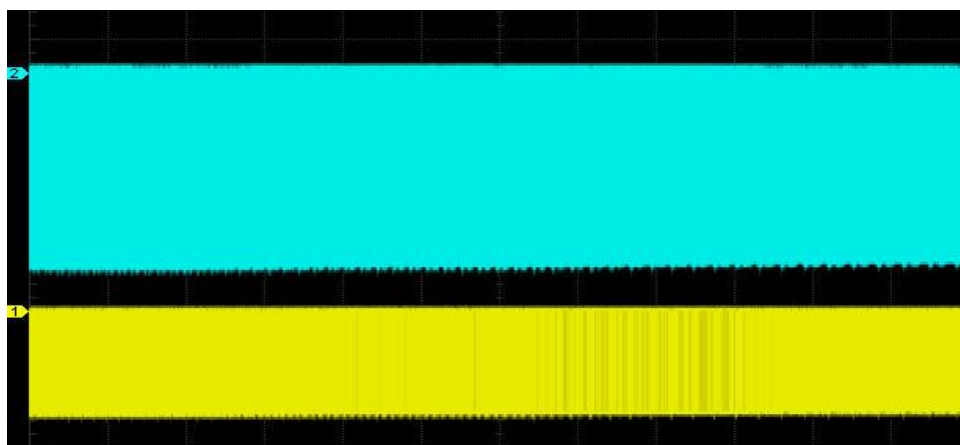


Рис. 6. «Эталонная» осциллограмма зависимости временной зависимости излучения ЛГН-207

Fig. 6. "Standard" time dependence oscillogramme of the LGN-207 radiation

При разогреве лазеров после включения длина резонатора начинает увеличиваться, и индексы мод, попадающих в контур генерации, будут иметь большее значение. Это увеличение частоты ничтожно по сравнению со значением центральной частоты контура, но, тем не менее, можно наблюдать смещение мод относительно контура генерации, когда мода q с меньшей частотой выходит из контура, мода $q+1$ находится почти в центре, а мода $q+2$ с большей частотой входит в контур генерации. На Рис. 7 представлена блок-схема экспериментальной установки для наблюдения продольных мод двухмодовых He-Ne лазеров с использованием интерферометра Фабри-Перо.

Излучение He-Ne лазера, пройдя через линзовый расширитель, попадает в ИФП 3 с базой 30 мм и областью свободной дисперсии, превышающей ширину контура усиления неона. Интерференционная картина наблюдалась через фокусирующую линзу (4), поляризатор (5), зрительную трубку (6) глазом, или регистрировалась фотокамерой (7) в режиме непрерывной съемки.

Наблюдения проводились без поляризатора (5), с неподвижным поляризатором и с вращающимся поляризатором. В первом случае наблюдаются интерференционные картины, схематично показанные на Рис. 8, для разных моментов эволюционного цикла. Качественно характер изменений в циклах соответствует поведению сигналов, которые наблюдались в вышеописанном (в разделе 1) эксперименте. Отличие в том, что здесь происходит разделение мод по частоте, и мы можем однозначно утверждать, что наблюдаемое интерференционное кольцо относится к определенной продольной моде.

В начале цикла 1 мы наблюдаем кольца, соответствующие двум продольным модам, в некотором порядке интерференции вблизи центра картины. С течением времени диаметры колец, соответствующих этим модам, уменьшаются, т. к. изменяются частоты мод, и в положении 3 внутреннее кольцо исчезает и происходит перескок в положение 1. Затем внешнее кольцо постепенно занимает положение внутреннего, и появляется новое внешнее кольцо. Такая эволюция определяется движением продольных мод относительно контура усиления (точнее контура генерации) неона в сторону уменьшения частоты. Внутреннее кольцо соответствует частоте моды, которая выходит из контура, а новое внешнее кольцо соответствует моде, которая входит в контур. Наблюдение относительного перемещения колец интерференционной картины позволяет оценить ширину контура генерации. Для лазеров типа ЛГН-207 и ЛГН-208 эта оценка дает величину порядка 1,2 ГГц. Более точный результат можно получить, используя непрерывную

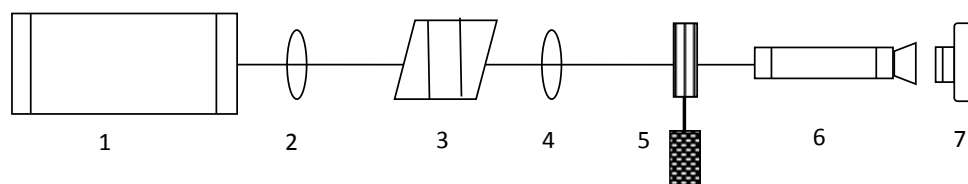


Рис. 7. Экспериментальная установка с ИФП для наблюдения продольных мод

Fig. 7. Experimental setup with the FP interferometer to monitor the longitudinal modes

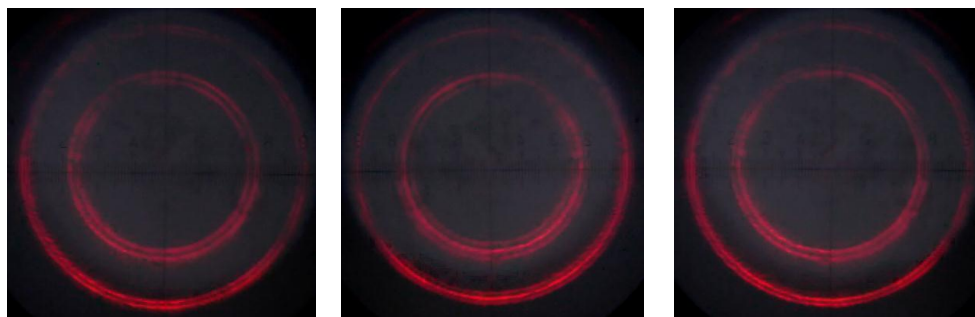


Рис. 8. Эволюция интерференционной картины при разогреве лазера в течение одного цикла

Fig. 8. The interference pattern evolution at laser heating in one cycle

съемку перемещения интерференционных колец. При этом в некоторых лазерах ЛГН-207 в определенный момент времени перед перескоком мод наблюдалось три кольца, что практически не заметно для невооруженного глаза. Это говорит о том, что ширина контура генерации несколько больше двух межмодовых расстояний. Используя метод гетеродинирования мы определили, что межмодовый интервал для конкретных лазеров равен 643 МГц и 645 МГц. Таким образом, для ширины контура генерации можно принять значение более 1 290 МГц.

Если установка неподвижного поляризатора под разными углами позволяет утверждать, что наблюдаемые моды поляризованы ортогонально, то использование вращающегося поляризатора и фотосъемки позволяет более точно определить моменты перескока мод и промежуток времени между перескоками, т. е. продолжительность цикла. По нашим оценкам, продолжительность циклов составляет приблизительно от 1 сек сразу после включения лазера до единиц и десятков минут в зависимости от индивидуальных особенностей лазера и конкретных условий, что хорошо согласуется с результатами работы [3: 17]. Качественно изготовленный или хорошо сохранившийся лазер должен через 20-30 мин выходить на стационарный режим работы.

Выводы

В результате проведенных исследований показано, что:

- поведение излучения различных экземпляров лазеров ЛГН-207 в первые 30 минут заметно отличается друг от друга;
- при сравнительно постоянном уровне выходной мощности (с флуктуациями порядка 5%; Рис. 1) поляризационные составляющие претерпевают довольно большие амплитудные скачки, достигающие до 40% (Рис. 2-4).
- существуют лазеры, в которых «перескоки» поляризации мод минимальны или отсутствуют;
- даже при малом электрическом пробое или утечке в трубке или блоке питания поляризационные характеристики лазеров приобретают хаотический характер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басов Н. Г. Двухмодовые газовые лазеры и их применение в спектроскопии и оптических стандартах частоты (обзор) / Н. Г. Басов, М. А. Губин, В. В. Никитин, Е. Д. Проценко // Квантовая электроника. 1984. Том 11. № 6. С. 1084-1105.
2. Борисовский С. П. Двухчастотные стабилизированные лазеры для точных измерений / С. П. Борисовский, С. Ю. Поляков, Е. Г. Чуляева // Тезисы доклада VI Всесоюзной конференции «Оптика лазеров». Л., 1990.
3. Гончуков С. А. He-Ne лазеры на 0,63 мкм в режиме генерации 2-х ортогонально поляризованных мод: Препринт / С. А. Гончуков и др. М., 1981.
4. Демтредер В. Лазерная спектроскопия / В. Демтредер. Наука, 1985. 2-е изд. 608 с.
5. Дубов В. П. Получение модулированного неполяризованного излучения гелий-неонового лазера / В. П. Дубов, А. Ю. Потоцкий, В. А. Табарин // Вестник Тюменского университета. 2014. № 7.
6. Керносов М. Ю. Подавление поляризационной нестабильности в частотно-стабилизированных гелий-неоновых лазерах / М. Ю. Керносов, Ю. В. Киселев, Г. В. Мельничук, Е. Г. Чуляева // Научно-технические ведомости СПбГТУ. Физико-математические науки. 2013. № 2(170).
7. Goldwasser S. M. Sam's LaserFAQ / S. M. Goldwasser. URL: <http://laserfaq.ru>
8. Isknor N. R. Polarization and Hopping in a Gas Laser / N. R. Isknor. University of Waterloo, 1966. 34 pp.
9. Zhang S. Orthogonal Polarization in Lasers. Physical Phenomena and Engineering Applications / S. Zhang, W. Holzapfel. Tsinghua University Press, 2013. DOI: 10.1002/9781118346501

Alexander A. GARMONOV¹
Vladimir P. DUBOV²
Anton Yu. POTOTSKIY³

**THE EVOLUTION OF OUTPUT POWER
AND POLARIZATION MODES AT ESTABLISHING
THE STATIONARY HEAT REGIME
IN THE TWO-MODE HE-NE LASERS**

- ¹ Senior Lecturer, Radio Physics Department,
Tyumen State University
gamma125@mail.ru
- ² Cand. Sci. (Phys-Math.), Associate Professor,
Radio Physics Department, Tyumen State University
duboff@mail.ru
- ³ Post-Graduate Student, Radio Physics Department,
Tyumen State University
ponab@yandex.ru

Abstract

Helium-neon lasers of various types are widespread and used in various fields and sectors of economic and scientific activities. The aim of this work was to study the evolution of output and some other laser parameters when setting the stationary working thermal conditions.

The article presents the first part of the study material on behavior of some low-power dual-mode helium-neon lasers in the process of establishing a stationary thermal regime. Several instances of such lasers were studied (from 3 to 6 depending on the experiments). We attempted to understand the causes and evolution of the fluctuations of the laser power output. Also we consider the behavior of individual longitudinal modes amplitude and their polarization in the first 10 to 30 minutes after the start, when the thermal expansion of main laser elements leads to a noticeable change in their output parameters. Experiments and optical circuit systems using polarization and interference devices such as a Wollaston prism, Fabry-Perot and other original devices described.

Citation: Garmonov A. A., Dubov V. P., Pototskiy A. Yu. 2016. "The Evolution of the Output Power and Polarization Modes at Establishing the Stationary Heat Regime in the Two-Mode He-Ne Lasers". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 2, no 3, pp. 94–106.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-3-94-106

In this experimental study we investigated output characteristics of multiple instances of a helium-neon lasers dual mode type LGN-207A, LGN-207B ranging from 1 to 2.2 mW, the radiation which has not clearly marked polarization. Even with such a small sample we showed that: a) the emission behavior of different specimens of these lasers in the first 30 minutes, is markedly different from each other; b) there are lasers in which “jump” modes are minimal or non-existent; c) when even small electrical breakdown in the tube or the power supply occurs, polarization characteristics of lasers become chaotic.

We hope that the results will allow experimenters and designers to make more confident selection of laser technology for the acquisition of the measuring instrument and research complexes.

Keywords

Power, heat, resonator, mode, polarization.

DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-3-94-106

REFERENCES

1. Basov N. G., Gubin M. A., Nikitin V. V., Protsenko E. D. 1984. “Dvukhmodovye gazovye lazery i ikh primeneniye v spektroskopii i opticheskikh standartakh chastoty (obzor)” [Two-Mode Gas Lasers and Their Applications in Spectroscopy and Optical Frequency Standards (Review)]. *Quantum Electronics*, vol. 11, no 6, pp. 1084-1105.
2. Borisovskiy S. P., Polyakov S. Yu., Chulyaeva E. G. 1990. “Dvukhchastotnye stabilizirovannye lazery dlya tochnykh izmereniy” [Two-Frequency Stabilized Lasers for Precision Measurements]. *Proceedings of the VI All-USSR Conference “Optika lazerov”*. Leningrad.
3. Demtredre V. 1985. *Lazernaya spektroskopiya [Laser Spectroscopy]*. 2nd edition. Nauka.
4. Dubov V. P., Pototskiy A. Yu., Tabarin V. A. 2014. “Poluchenie modulirovannogo nepolyarizovannogo izlucheniya geliy-neonovogo lazera” [The Production of the Modulated Unpolarized Radiation Helium-Neon Laser]. *Tyumen State University Herald*, no 7.
5. Goldwasser S. M. Sam’s LaserFAQ. <http://laserfaq.ru>
6. Gonchukov S. A. 1981. He-Ne lazery na 0,63 mkm v rezhime generatsii 2-kh ortogonalno polyarizovannykh mod [He-Ne Lasers at 0.63 Microns in a Generation Mode 2 Orthogonally Polarized Modes], preprint. Moscow.
7. Isknor N. R. 1966. Polarization and Hopping in a Gas Laser. University of Waterloo.
8. Kernosov M. Yu., Kiselev Yu. V., Melnichuk G. V., Chulyaeva E. G. 2013. “Podavlenie polarizatsionnoy nestabilnosti v chastotno-stabilizirovannykh geliy-neonovykh lazerakh” [The Suppression of the Polarization Instability in the Frequency-Stabilized He-Ne Lasers]. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics*, no 2(170).
9. Zhang S., Holzapfel W. 2013. *Orthogonal Polarization in Lasers. Physical Phenomena and Engineering Applications*. Tsinghua University Press. DOI: 10.1002/9781118346501