

Г. А. ЛЕНКОВА, А. И. ЛОХМАТОВ, И. А. МИХАЛЬЦОВА  
(Новосибирск)

### ОДНОЧАСТОТНЫЙ СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ ГЕЛИЙ-НЕОНОВЫЙ ЛАЗЕР

К оптическим квантовым генераторам для лазерных интерферометров предъявляют ряд жестких требований. Они могут быть сведены к следующим: малые габариты, одночастотный режим работы, высокая воспроизводимость длины волны излучения, стабильность мощности, продолжительный срок службы и минимальное время готовности прибора к работе.

Ниже рассмотрены особенности гелий-неонового лазера ( $\lambda = 0,63$  мкм), разработанного в Институте автоматики и электрометрии СО АН СССР для измерителя перемещений. Выбор этого типа лазера обусловлен тем, что его спектральные характеристики в настоящее время изучены наиболее подробно.

Конструкция лазера показана на рис. 1. Основой резонатора является толстостенная инваровая труба 3 диаметром 42 мм, в которой сверху

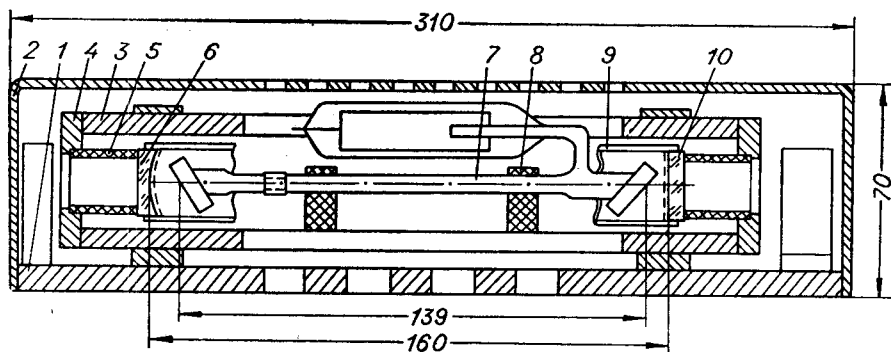


Рис. 1. Конструкция лазера.

и снизу выбраны два продольных паза, предназначенных для введения активного элемента 7 и улучшения теплового режима. Активный элемент 7 устанавливается внутри трубы 3 с помощью крепления 8. На торцах трубы расположены юстируемые фланцы 4 с пьезокерамическими элементами 5. В оправы, приклеенные к элементам 5, установлены зеркала 6 ( $R = 500$  мм) и 10 ( $R = \infty$ ) с коэффициентами пропускания 0,05

и 0,4% соответственно. Одно из брюстеровских окон выполнено из стекла, другое — из кварца. Колпаки 9 защищают окна и зеркала от пыли. Лазер закреплен на основании 1 и закрыт кожухом 2.

Конструкция лазера определялась в первую очередь требованием одностотности излучения. Из многочисленных способов фильтрации частоты выбран наиболее простой, позволяющий максимально сократить габариты прибора. Он заключается в уменьшении длины резонатора до некоторой оптимальной, при которой расстояние между соседними продольными видами колебаний сравнимо с шириной доплеровского контура. В этом случае лазер работает в режиме одной-двух мод, а при настройке на провал Лэмба, совпадающий с центром кривой усиления, в одной продольной моде. Подобный метод селекции уступает другим по уровню мощности. Однако получаемая мощность достаточна для построения интерферометров с фотоэлектрической регистрацией. В соответствии с [1] длина резонатора  $L$  выбрана равной 160 мм, а диаметр капилляра  $2a = 1,1$  мм. Число Френеля в этом случае равно

$$N = \frac{a^2}{\lambda L} = 3.$$

Для таких больших значений  $N$  невозможна эффективная селекция поперечных мод [2]. Уменьшение  $N$  достигалось небольшими перекосами зеркал резонатора относительно оси капилляра.

Наличие одночастотного излучения еще недостаточно для использования лазера как источника света в интерферометрии. Если не принимаются специальные меры, то неопределенность длины волны излучения будет составлять около  $1 \cdot 10^{-6}$ . Непостоянство определяется нестабильностью длины резонатора, вызванной механическими и температурными воздействиями внешней среды.

Возможны два пути стабилизации частоты излучения: активный и параметрический. Первый заключается в привязке частоты к реперной точке в кривой усиления. Для второго характерно применение методов компенсации, уменьшающих воздействие температурных изменений на параметры резонатора, а также термо- и баростатирование объема резонатора. При этом необходимо стабилизировать мощность накачки активного элемента для поддержания постоянной концентрации электронов в плазме разряда. Технические трудности, связанные с реализацией всех требуемых мер компенсации, делают последний путь трудноосуществимым. Кроме того, воспроизводимость длины волны излучения для группы лазеров одного и того же типа будет лежать в пределах ширины контура усиления.

Разработанная конструкция лазера предполагала активную [3] и частичную параметрическую стабилизацию. Параметрическая стабилизация была направлена на снижение величины линейного расширения резонатора и уменьшение времени установления теплового равновесия резонатора с окружающей средой. Чем меньше эти параметры, тем уже диапазон регулирования системы активной стабилизации, что существенно улучшает ее эксплуатационные характеристики, снижает габариты и вес.

Было исследовано несколько типов резонаторов. Первоначально резонатор выполнялся из кварцевой трубы диаметром 60 мм. Предполагалось, что кварц будет незначительно расширяться и лазер будет быстро приходиться в состояние теплового равновесия. Действительно, удлинение резонатора составило 0,5 мкм и время установления теплового равновесия 15 мин. При уменьшении диаметра до 40 мм характеристики резонатора значительно ухудшились из-за низкой теплопроводности

кварца. Центральная часть трубы разогревалась значительно сильнее торцов, перепад температуры составлял 20°C. В результате лазер непрерывно перестраивался и время установления частоты возрастало до 50 мин. Один из вариантов резонатора был выполнен в виде скобы из инвара. Конструкция мало подвергалась тепловым изменениям, но была чрезвычайно чувствительной к механической тряске.

В результате испытания различных вариантов наиболее удачной (см. таблицу) оказалась конструкция резонатора в виде инваровой трубы диаметром 40 мм. Форма трубы придает резонатору жесткость, а низкий коэффициент линейного расширения и высокая теплопроводность инвара создают хорошие условия для сокращения времени подготовки лазера к работе.

Тип резонатора	Материал корпуса	Тип катода	Число провалов Лэмба за 30 мин.	Удлинение резонатора за 30 мин, мкм	Время установления теплового равновесия, мин.	Общее число провалов до установления теплового равновесия
Цилиндр $\varnothing$ 60 мм с вырезом сверху и снизу	Кварц плавленый	Термоэлектронный выносной	1,5	0,5	15	1,5
Цилиндр $\varnothing$ 40 мм с вырезом сверху	То же	То же	12	3,8	50	13,5
Цилиндр $\varnothing$ 40 мм с вырезом сверху	"	Холодный коаксиальный	8	2,5	80	11
Скоба	Сталь	То же	30	9,6	> 100	50
Скоба	Инвар	"	3	0,9	30	3
Цилиндр $\varnothing$ 40 мм с вырезами сверху и снизу	"	"	8	2,5	60	12
Цилиндр $\varnothing$ 60 мм с вырезом сверху	"	"	6	1,8	170	13
Цилиндр $\varnothing$ 40 мм с вырезами сверху и снизу	"	Холодный выносной	4	1,2	40	5

На распределение теплового поля и время установления равновесного состояния значительное влияние оказывает также форма и тип активного элемента, который является источником тепловой энергии. В процессе разработки лазера были исследованы три типа газоразрядных трубок. В первом варианте использовался термоэлектронный катод, две другие имели холодный катод. Переход на холодный катод преследовал цель увеличения срока службы и уменьшения рассеиваемой мощности.

Первоначально холодный катод располагался коаксиально относительно капилляра. Подобная конструкция технологически трудна в изготовлении, но компактна и имеет большой газовый объем. Трубка с коаксиальным катодом оказалась удобной для юстировки интерферометра. Дело в том, что плоскость поляризации излучения источника должна быть согласована с ориентацией отражающих плоскостей оптических элементов интерферометра. Положение плоскости поляризации устанавли-

ливалось поворотом активного элемента вокруг оси; при этом не нарушались температурные условия внутри резонатора.

Однако в процессе исследования лазера выявилось, что эта конструкция имеет ряд существенных недостатков. Во-первых, после 200—300 ч работы поджиг трубки был затруднен и приходилось менять параметры блока питания. Во-вторых, форма провала Лэмба в кривой усиления мощности не оставалась постоянной в процессе работы лазера: через 3—4 ч после включения глубина провала значительно уменьшалась, что отрицательно сказывалось на работе системы стабилизации. В-третьих, большая тепловая инерционность коаксиальной конструкции увеличила время установления теплового равновесия, а размещение катода внутри резонатора приводило к повышению его температуры.

В окончательном варианте была принята форма активного элемента, показанная на рис. 1. Анодом служит коваровое кольцо, расположенное последовательно с капилляром. Холодный катод представляет собой алюминиевый стакан, на поверхности которого в процессе активировки образуется слой окиси алюминия. Наполнение трубки — смесь изотопов  $\text{Ne}^3$  и  $\text{Ne}^{20}$  при соотношении 7 : 1 и полном давлении 3 мм рт. ст. Полное давление и соотношение компонентов выбирались из условия максимума мощности генерации [4]:  $pd = 3,6$ , где  $p$  — полное давление в мм рт. ст., а  $d$  — диаметр капилляра в мм.

Одна из главных задач, которая преследовалась при разработке лазера, заключалась в повышении срока службы трубки. Первоначально при испытании лазеров было обнаружено, что у значительной части лазеров через 200—300 ч работы заметно падает мощность генерации, что сопровождается изменением цвета разряда. По достижении 350 ч работы генерация прекращалась. Было выяснено, что снижение мощности генерации, сопровождаемое появлением фиолетового оттенка разряда, вызывается выделением газообразных веществ из смолы, которой приклеиваются брюстерские окна. Применение новой, более качественной смолы устранило это явление. Для выяснения причин уменьшения мощности исследовалось изменение спектрального состава спонтанного излучения лазерных трубок в процессе их работы. Анализ спектров показал, что при изменении цвета разряда вплоть до белого происходит падение процентного содержания  $\text{Ne}^{20}$  и уменьшение полного давления газа в трубке. Так, у всех вышедших из строя трубок содержание неона упало ниже 4% (0,07—0,08 мм рт. ст.), а полное давление уменьшилось на 0,6—0,8 мм рт. ст. По современным представлениям, потери неона вызываются внедрением атомов неона в стенки капилляра и поверхность катода и геттерными процессами при распылении катода. Было замечено, что резкое снижение количества неона в трубке совпадает с началом заметного распыления катода. В связи с этим была изменена технология обработки и наполнения трубки. Увеличено время активировки катода и насыщения стенок смесью  $\text{Ne}^3$ — $\text{Ne}^{20}$ . Попытка увеличить общее давление и процентное содержание неона привела к нежелательным последствиям. Повышение полного давления сопровождалось уменьшением глубины провала Лэмба и усилением шумов разряда, вызываемых образованием бегущих страт. Увеличение процентного содержания неона вызывало падение мощности.

Окончательно была разработана следующая технология изготовления трубки. После приваривания катодного баллона к капиллярной трубке и наклейки окон Брюстера производится активировка катода в атмосфере кислорода при давлении 2—3 мм рт. ст. в течение 30 мин. и токе 80—100 мА. По окончании активировки разрядная трубка подвергается очистке разрядом в смеси  $\text{Ne}^3$ — $\text{Ne}^{20}$ . Одновременно происхо-

дит насыщение стенок трубки и катода рабочим газом. Очистка и насыщение осуществляются с помощью дополнительного катода при токе 50—60 мА в течение 60 мин. После проведения всех подготовительных операций трубка наполняется рабочей смесью  $\text{He}^3\text{—Ne}^{20}$ . При наполнении контролируется глубина провала, уровень шумов и мощность генерации. Срок службы у трубок, выполненных по этой технологии, составляет 3000 ч.

Особое внимание было уделено устранению причин, вызывающих изменение мощности генерации в процессе работы, так как постоянство мощности излучения — необходимое условие для надежной работы лазерного интерферометра.

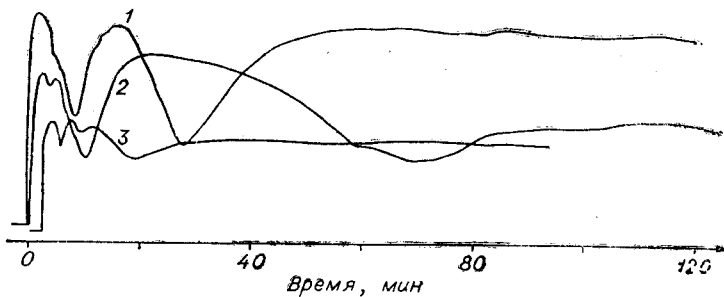


Рис. 2. Диаграмма изменения выходной мощности лазера в зависимости от времени:  
1, 2 — стеклянное плоское зеркало, углы клина 5 и 20'' соответственно;  
3 — оба зеркала — стеклянные, сферические.

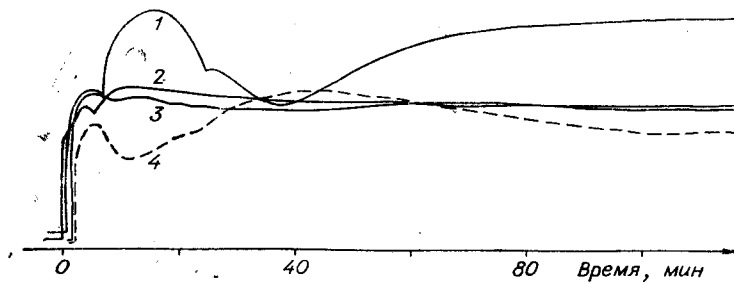


Рис. 3. Диаграмма изменения выходной мощности лазера в зависимости от времени:  
1, 2, 3 — стеклянное плоское зеркало, углы клина 20'', 2' и 8' соответственно;  
4 — кварцевое плоское зеркало, угол клина 5'.

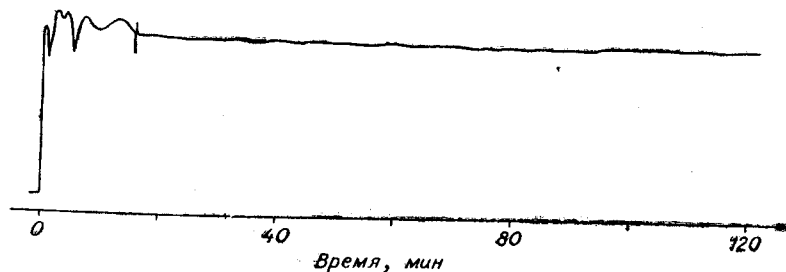


Рис. 4. Изменение выходной мощности лазера, помещенного в корпус интерферометра; через 20 мин включается система стабилизации.

Для наблюдения изменений мощности генерации в течение рабочего дня (6—7 ч) сигнал с ФЭУ, на фотокатод которого падало излучение лазера, регистрировался на диаграммной ленте самописца. Записи выявили значительные колебания выходной мощности лазеров в первые 1—1,5 ч работы, причем период колебаний постепенно увеличивался, и по истечении указанного времени мощность стабилизировалась в пределах 3—4%. Изменения мощности, вызванные нестабильностью блоков питания лазера и фотоприемника, контролировались отдельно и не превышали 2% за 8 ч. Поскольку одно из брюстеровских окон было стеклянным, влияние на выходную мощность лазера излучения на длине волны 3,39 мкм исключалось. Было предположено, что на изменение мощности влияет образование трехзеркального резонатора нерабочей поверхностью плоского зеркала. Это предположение основывалось на том, что непараллельность стандартных плоских зеркал обычно не превышает 5". На рис. 2, 3 представлены диаграммы изменений мощности во времени для лазеров с различной клиновидностью плоского зеркала и с двумя сферическими зеркалами. При углах клина плоского зеркала 2' и более колебаний мощности не наблюдается. Замена плоского зеркала сферическим приводит к аналогичному результату.

В заключение на рис. 4 приведены результаты регистрации выходной мощности лазеров, помещенных в корпус интерферометра и работающих с системой активной стабилизации. Время подготовки лазера к работе составляет не более 20 мин. После включения системы активной стабилизации изменения мощности лежат в пределах 4%.

Основные параметры разработанного лазера были следующими: выходная мощность 0,1—0,3 мВт, стабильность мощности за 8 ч работы 3—4%, срок службы около 3000 ч. Длина волны в вакууме для центра провала Лэмба принималась нами равной 0,63299140 мкм, относительная стабильность длины волны при работе с системой активной стабилизации составляла за 8 ч непрерывной работы  $3 \cdot 10^{-9}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. I. A. Collinson, A. Stable. Single-Frequency RF-Excited Gas Lasers, 6328 Å.—The Bell System Technical Journal, 1965, v. XLIV, № 7.
2. Лазеры. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
3. А. И. Лохматов, В. А. Ханов. Система стабилизации частоты газового лазера по провалу Лэмба.—Автометрия, 1971, № 1.
4. Р. Л. Филд. Рабочие параметры гелий-неоновых лазеров с накачкой постоянным током.—Приборы для научных исследований, 1967, № 12.

*Поступила в редакцию  
8 сентября 1970 г.*