

Г. Ф. МАЛЫШЕВ, Ю. В. ТРОИЦКИЙ, В. А. ХАНОВ,
В. П. ХЮПЕНЕН

(Новосибирск)

СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ ОДНОЧАСТОТНЫЙ ГЕЛИЙ-НЕОНОВЫЙ ЛАЗЕР

Создание стабильных по частоте одночастотных ОКГ повышенной мощности является одной из самых актуальных практических задач квантовой электроники. В настоящее время существуют как надежные методы получения одночастотной генерации, так и хорошие методы стабилизации частоты, поэтому решение указанной задачи обычно не представляет принципиальных затруднений. Однако технические трудности, степень сложности конструкции и срок службы всей системы в большой степени зависят от того, какой вариант выбран из большого числа возможных. Что касается выбора метода получения одночастотной генерации, то наиболее целесообразным [1] представляется применение поглощающей пленки или дифракционного селектора. ОКГ, использующие эти селекторы, могут быть сделаны стабилизированными или перестраиваемыми по частоте; этот вопрос более подробно рассмотрен в [2]. Что касается метода стабилизации частоты, то здесь имеется две возможности: стабилизировать по спектральной линии или по собственной частоте стабильного пассивного резонатора. Первый вариант обеспечивает рекордную долговременную стабильность и воспроизводимость частоты, что очень существенно для метрологических применений. При использовании метода пассивного резонатора воспроизводимость частоты значительно ниже, так как эта частота не сравнивается с частотой атомного перехода. Однако благодаря применению термкомпенсации [3] и термостатирования пассивного резонатора можно получить долговременную стабильность, достаточную для многих применений. Преимуществом метода пассивного резонатора является возможность частотного разнесения большого числа каналов в пределах одной линии путем использования нескольких взаимно расстроенных лазеров и эталонов. Конструкция резонатора может предусматривать возможность плавной тепловой и электрической подстройки резонатора и всего лазера в пределах всей линии. Следует также отметить, что стабилизация по пассивному резонатору является единственно возможной в случае твердотельных (в том числе полупроводниковых) и жидкостных лазеров. Сказанное позволяет сделать вывод, что такой метод является весьма перспективным для большинства применений (в том числе для оптической связи и голографии). Здесь можно видеть аналогию с положением в обычной радиотехнике, где в подавляющем большин-

стве случаев для стабилизации частоты генераторов используются кварцевые резонаторы, несмотря на то, что по воспроизводимости частоты они уступают квантовым стандартам.

В настоящей работе описывается стабилизированный по частоте гелий-неоновый лазер (0,63 мкм), в котором стабильный пассивный резонатор, вводимый внутрь резонатора лазера, служит также и для получения одночастотной генерации.

Описание лазера. В качестве пассивного резонатора, дающего репер частоты, и одновременно селектора видов колебаний в лазере был использован отражающий интерферометр, который состоит из поглощающей металлической пленки и высокоотражающего зеркала. За основу конструкции лазера был принят серийно выпускаемый прибор типа ЛГ-36А («одномодовый»), разрядная трубка которого и источник питания были использованы без изменений, а резонатор лазера подвергся следующим переделкам.

1. Плоское зеркало резонатора заменено отражающим интерферометром.

2. Резонатор удлинен с той стороны, где обычно крепится плоское зеркало, и установлен дополнительный фланец, в котором закреплен отражающий интерферометр. Фланец, в котором раньше крепилось плоское зеркало, оказался внутри резонатора и использовался для крепления вставляемого на время вспомогательного зеркала, что удобно для юстировки всей системы. Свободный промежуток длиной 65 мм между интерферометром и старым фланцем предназначается для установки в резонатор дополнительных оптических деталей.

3. Сферическое зеркало на другом конце резонатора закреплено на пьезокерамике для автоподстройки длины резонатора. Коэффициент пропускания этого зеркала увеличен до 3% в связи с тем, что через это зеркало осуществляется вывод излучения.

4. Кожух лазера реконструирован таким образом, чтобы улучшить теплоизоляцию резонатора от разрядной трубки.

Схема отражающего интерферометра показана на рис. 1. Здесь 1 и 2 — удлиняющие инваровые стержни; 3 — фланец для крепления ин-

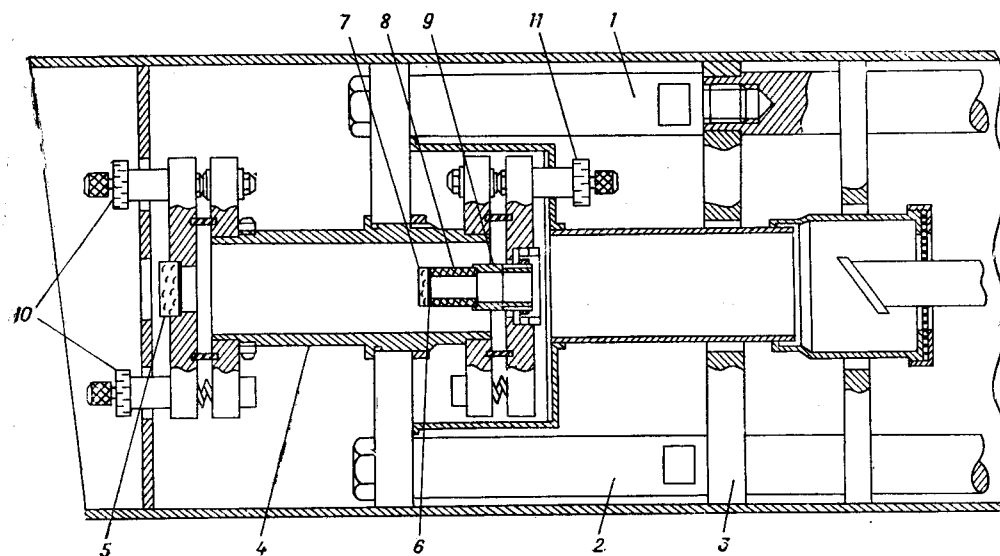


Рис. 1.

терферометра; 4 — корпус интерферометра. Последний состоит из плоского зеркала 5 с малым пропусканием и тонкого поглощающего слоя серебра 6 на кварцевой подложке 7. Подложка 7 закреплена на пьезокерамике 8, имеющей длину 28 мм и наружный диаметр 18 мм. Внешняя обкладка пьезокерамики разделена на две неравные изолированные части; на меньшую часть подавалось сканирующее напряжение с частотой 27 кГц, на большую — постоянное напряжение для установки частоты лазера в пределах спектральной линии и для плавной его перестройки. Поглощающая пленка в бегущей волне имеет коэффициент пропускания $T=0,806$ и поглощения $A=0,167$ и при помощи диэлектрических покрытий сделана оптически симметричной, благодаря чему при перемещении пленки резонатора вблизи узла электрического поля резонатор ОКГ практически не расстраивается [4], и сигнал ошибки для автоподстройки лазера вырабатывается без заметной частотной модуляции лазера.

Корпус 4 изготовлен из инвара. Пьезокерамика 8 и промежуточная деталь 9 регулируемой длины (из латуни) служат для термокомпенсации длины интерферометра. Зеркало 5 и пленка 6 могут юстироваться при помощи двух пар дифференциальных винтов 10 и 11. Полная оптическая длина резонатора $L=1970$ мм, длина интерферометра $l=81$ мм.

Система автоматической подстройки частоты (АПЧ). Общая схема автоподстройки частоты в основном соответствует рис. 1, б в [2]. Для увеличения надежности и компактности вся электронная часть системы выполнена на интегральных микросхемах и транзисторах (13 микросхем, 16 транзисторов). Электронная функциональная схема системы АПЧ показана на рис. 2, где несколько более подробно выделены наиболее интересные узлы.

Для определения отклонения частоты генерации ОКГ от частоты, при которой поглощающая пленка 3 находится в узле электрического поля стоячей волны, на модулирующую пьезокерамику 4 подается синусоидальный сигнал с частотой 27 кГц, вызывающий амплитудную модуляцию выходного излучения. Электрический сигнал с выхода фотоприемника (ФД-3) усиливается избирательным усилителем, настроенным на частоту сигнала. Полоса пропускания усилителя $2\Delta f=4$ кГц, коэффициент усиления $K=60$. Сигнал рассогласования с выхода усилителя и опорное напряжение с частотой 27 кГц от генератора подаются на фазовый детектор. Выходное напряжение фазового детектора управляет интегратором ($C_2=1,0$ мкФ, $R_4/R_2=10$), выполненным на базе операционного усилителя Э₁ (1УТ401Б). Включение ускоряющего конденсатора C_1 (0,1 мкФ) позволило повысить устойчивость и расширить частотную характеристику системы АПЧ. Сигнал с выхода интегратора усиливается регулирующим усилителем постоянного тока ($K=200$; $R_{\text{вых}}=150$ кОм) и подается на управляющую пьезокерамику 6. Выходной каскад регулирующего усилителя, выполненный на транзисторах Т₄—Т₇ типа КТ604Б, собран по дифференциальной схеме, причем каждое плечо его состоит из двух последовательно соединенных транзисторов.

Система АПЧ сохраняет работоспособность при значительных тепловых удлинениях резонатора ОКГ, компенсация которых для имеющихся образцов пьезокерамики требовала бы управляющего напряжения, превышающего динамический диапазон выходного каскада регулирующего усилителя. Во избежание этого при выходных напряжениях регулирующего усилителя, превышающих предельное значение, автоматически разряжается интегрирующий конденсатор C_2 и устанавливается нулевое напряжение на управляющей пьезокерамике 6. Дискриминаторы Д₁ и Д₄ с помощью делителей R_{14} — R_{17} и R_{21} — R_{24} настроены

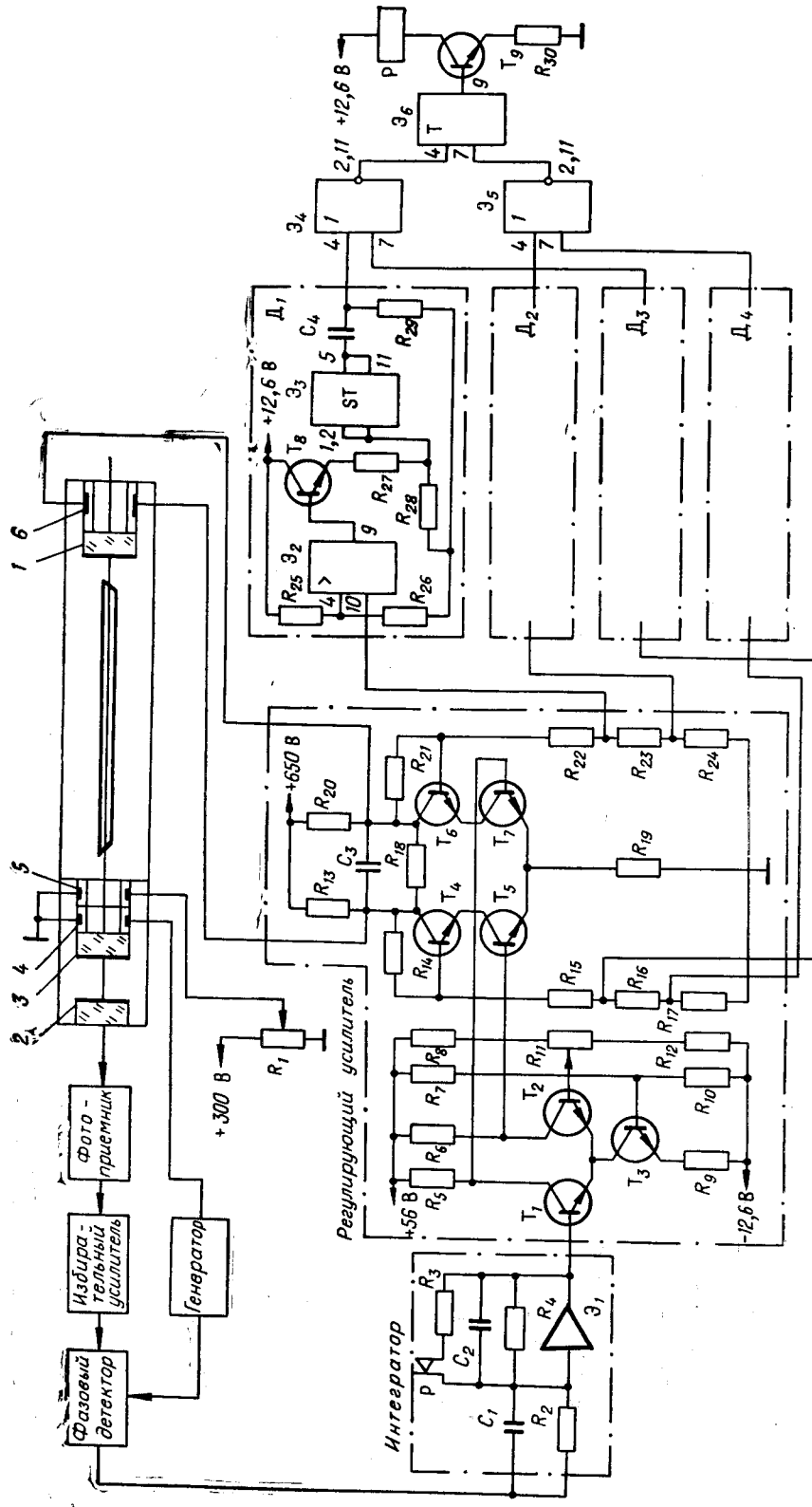


Рис. 2.

соответственно на уровне управляющего напряжения $U_{упр} = \pm 350$ В, а D_2 и D_4 — на $U_{упр} = \pm 5$ В. В случае, когда из-за изменения длины резонатора лазера подстройка «сопровождаемого» вида колебаний на собственную частоту эталона требует слишком большого управляющего напряжения и это напряжение выходит за пределы рабочего диапазона регулирующего усилителя, срабатывает дискриминатор D_1 (D_3). Он состоит из нуля-органа, выполненного на базе дифференциального усилителя \mathcal{E}_2 (П2222В), триггера Шмидта \mathcal{E}_3 (2НТ171Б) и дифференцирующей цепи $R_{29}C_4$. Отрицательный импульс с выхода дискриминатора, соответствующий отрицательному перепаду напряжения на выходе триггера Шмидта, формируется микросхемой \mathcal{E}_4 (2ЛБ172Б) и устанавливает триггер \mathcal{E}_6 в состояние, при котором транзистор T_9 открывается, реле Р срабатывает и C_2 разряжается. Напряжение на выходе регулирующего усилителя уменьшается до тех пор, пока не сработает дискриминатор D_2 (D_4), сигнал с выхода которого, сформированный микросхемой \mathcal{E}_5 (2ЛБ172Б), устанавливает триггер \mathcal{E}_6 в первоначальное состояние, при котором T_9 закрывается, реле Р размыкает свой контакт в цепи интегратора, цепь регулирования оказывается замкнутой и снова устанавливается стабильная генерация ОКГ на том виде колебаний, частота которого оказывается ближе всего к собственной частоте эталона. Таким образом, за исключением кратковременного (порядка 0,1 с) переходного режима, частота генерации остается неизменной даже при значительных абсолютных удлинениях резонатора и при использовании управляющей пьезокерамики малой чувствительности.

Характеристики лазера. Проведенные испытания стабилизированного одночастотного лазера показали хорошие результаты. При данном сочетании параметров резонатора, активной среды и поглощающей пленки одночастотный режим получался стабильно во всем спектральном интервале отражающего интерферометра, т. е. в диапазоне 1,85 ГГц, превышающем доплеровскую ширину линии 6328 Å. Максимальная одночастотная мощность на одной TEM_{00q} -моду равнялась 22 мВт, что составляет 67% полной мощности излучения лазера во многих TEM_{00q} -моду до вставления пленки. Стабилизация частоты могла быть осуществлена в любом месте указанного частотного диапазона в зависимости от величины постоянного смещения на обкладке пьезокерамики 5 (см. рис. 2), однако приведенные ниже экспериментальные данные относятся к случаю генерации вблизи центра линии, где одночастотная мощность выше.

Качество работы схемы АПЧ характеризуется рис. 3. Здесь показано, как меняется во времени напряжение на выходе фазового детектора. Запись производилась самописцем с постоянной времени 1 с. На участке АВ обратная связь была разомкнута. Около этой записи указан масштаб по частоте, определенный путем принудительного сканирования поглощающей пленки на расстояние, соответствующее переключению на соседнюю продольную моду (76 МГц). Как видно из записи

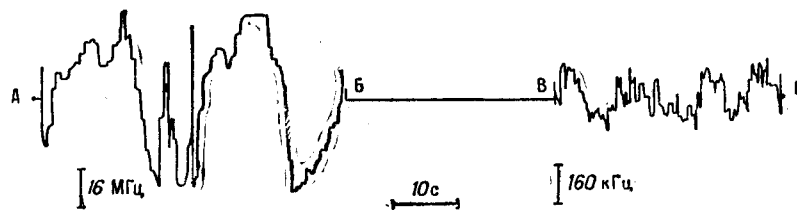


Рис. 3.

АБ, разность частоты генерации и собственной частоты интерферометра может достигать половины межмодового расстояния (± 38 МГц). В точке Б была замкнута цепь обратной связи, и колебания разностной частоты прекратились (интервал БВ). Для количественной оценки на участке ВГ была произведена запись с работающей АПЧ и с увеличенной в 100 раз чувствительностью самописца. Из этой записи видно, что девиация частоты имеет порядок 0,15 МГц, что соответствует относительному уходу частоты $3 \cdot 10^{-10}$.

Указанные цифры подтверждают хорошее качество работы системы стабилизации и приводят к выводу, что стабильность частоты лазера определяется главным образом стабильностью оптической длины отражающего интерферометра. Ввиду жесткости конструкции интерферометра основным фактором, определяющим уход частоты, является тепловое удлинение интерферометра. Как уже указывалось, была предусмотрена компенсация теплового удлинения. Подбор длины компенсирующей детали производился путем регистрации ухода линии генерации от частоты лэмбова провала (наблюдаемого на экране осциллографа) при повышении температуры интерферометра на 10°C . Повышение температуры производилось в течение нескольких часов, чтобы обеспечить выравнивание температуры и воспроизвести реальные условия эксплуатации. Достигнут уход частоты 100 МГц на 1°C , что было достаточно для конкретных применений образца лазера. Как известно, может быть получена и гораздо более полная компенсация (например, порядка $6 \cdot 10^{-8}$ на 1°C [3]).

Сканирование положения поглощающей пленки, необходимое для выработки сигнала ошибки при избранной схеме стабилизации, неизбежно сопровождается амплитудной модуляцией лазера. Как показали измерения при помощи ФЭУ, амплитуда фототока на частоте 27 кГц составляет всего 0,15% от постоянной составляющей и может считаться совершенно несущественной.

Были произведены также оценки частотной модуляции лазера, возникающей при сканировании пленки. Теоретические оценки могут быть основаны на работах [5, 6]. Непосредственное применение формулы (4) в [5] невозможно, так как эта формула получена для простейшего случая поглощающей пленки на границе двух сред, без учета диэлектрических покрытий. Однако, основываясь на более общей теории резонатора с селективными потерями [6], можно получить, по аналогии с (4) в [5], следующую формулу для сдвига резонансной частоты $\Delta\nu$ при перемещении пленки на небольшое расстояние Δl вблизи узла электрического поля (считаем, что оптическая длина L резонатора не меняется, и опускаем члены, содержащие $2\pi\Delta l/\lambda$ в степенях выше второй):

$$\frac{\Delta\nu}{(c/2L)} = \frac{2(\eta - 1)}{\eta + (1 - \eta)\frac{l}{L}} \left(\frac{\Delta l}{\lambda}\right) - \frac{\xi_1''}{\eta} \frac{8\pi}{\eta + (1 - \eta)\frac{l}{L}} \left(\frac{\Delta l}{\lambda}\right)^2. \quad (1)$$

Здесь, как и в [6], $\eta = A_2/A_1$, где A_1 — коэффициент поглощения света пленкой в бегущей волне, падающей на ту сторону пленки, которая в резонаторе обращена к активной среде; A_2 — то же, при падении света с противоположной стороны; ξ_1'' — параметр, введенный в [6] и для случая использования пленки без оптических покрытий пропорциональный ее реактивной проводимости; λ — длина волны; $c/2L$ — расстояние между модами резонатора. Для пленок, близких к симметричным, когда $A_1 \approx A_2$,

$$\frac{\Delta\nu}{(c/2L)} \approx 2(\eta - 1) \left(\frac{\Delta l}{\lambda}\right) - 8\pi\xi_1'' \left(\frac{\Delta l}{\lambda}\right)^2. \quad (2)$$

Для имеющейся у нас пленки $T=0,806$, $A_1=A_2=0,167$. Необходимо учитывать, что при нашей точности измерений в бегущей волне возможно отклонение параметра η от единицы примерно на $\pm 1\%$. Расчет ξ по формуле (9) в [6] дает $|\xi_1''|=0,4$; $c/2L=7,6 \cdot 10^7$ Гц. Следовательно, $\Delta\nu \lesssim 7,6 \cdot 10^7 \left[\pm 0,02 \frac{\Delta l}{\lambda} \pm 10 \left(\frac{\Delta l}{\lambda} \right)^2 \right]$. Измерение амплитуды сканирования на частоте 27 кГц при сканирующем напряжении 0,3 В дает значение $\Delta l=3 \cdot 10^{-4} \lambda$. Отсюда $|\Delta\nu| \lesssim |\pm 450 \pm 70|$ Гц. Таким образом, девиация частоты лазера в процессе сканирования пленки должна быть меньше 500 Гц.

Непосредственное измерение такой малой девиации затруднительно, и экспериментально была сделана лишь косвенная и значительно

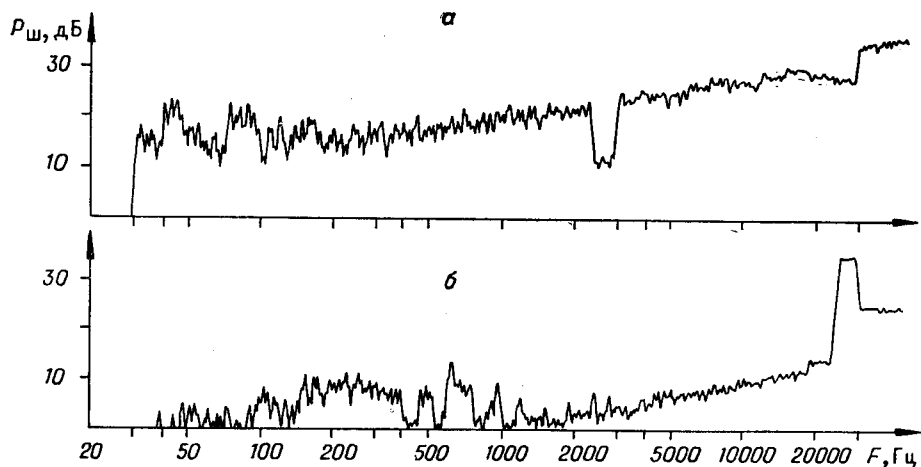


Рис. 4.

более грубая оценка. Для этого спектр лазера с выключенной АПЧ наблюдался при помощи сканирующего интерферометра Фабри — Перо, а пленка в резонаторе перемещалась вдоль оси на длину, равную расстоянию между узлами соседних продольных мод. При разрешающей способности интерферометра около 1 МГц изменение частоты генерации не было замечено. Если считать, что девиация пропорциональна перемещению пленки, то при рабочей амплитуде сканирования пленки это дает оценку верхней границы частотной девиации $\Delta\nu < 15$ кГц.

Представляет большой практический интерес сравнение уровня шумов лазера в многочастотном и одночастотном режиме. На рис. 4, а приведена запись спектра низкочастотных шумов $P_{ш}(F)$ лазера без пленки, в режиме многих продольных мод. Запись производилась при помощи анализатора спектра с постоянной относительной шириной полосы, равной $1/3$ октавы. Фотоприемником служил ФЭУ. На рис. 4, б произведена аналогичная запись для того же лазера с введенной поглощающей пленкой и включенной АПЧ. При этом режим разрядной трубки, выходная мощность лазера и чувствительность анализатора были такими же, как и для рис. 4, а. Сравнение этих двух записей показывает, что переход к одночастотному режиму снижает шумы в излучении ОКГ в диапазоне 1—40 кГц на 15—20 дБ по сравнению с многочастотной генерацией. Это связано, очевидно, с исключением нестационарной конкуренции («перескоков») мод. Другие авторы получали больший эффект, например уменьшение шумов на 43 дБ [7]. В нашем случае улучшение

не так значительно, по-видимому, из-за больших шумов газового разряда. Шумы в диапазоне до 1 кГц (см. рис. 4, б) связаны главным образом с влиянием вибраций, и простейшая амортизация лазера (например, резиновые прокладки толщиной 1 см) уменьшает их примерно на 10 дБ.

Заключение. Описанный в статье вариант создания стабилизированных одночастотных лазеров может быть использован не только в гелий-неоновом, но и в других газовых и твердотельных ОКГ непрерывного действия. Для других лазеров во многих случаях электронную часть системы АПЧ, описанную выше, можно применить без изменений, а приспособление всей системы к конкретным характеристикам ОКГ может заключаться лишь в особом подборе параметров поглощающей пленки и ее расстояния до зеркала.

Следует отметить, что описанный лазер плавно перестраивается по частоте путем подачи напряжения на пьезокерамику, и поэтому в случае необходимости может быть стабилизирован по спектральной линии (например, по лэмбову провалу).

Авторы выражают благодарность Н. Н. Каменеву за нанесение оптических покрытий и Ю. Г. Василенко за помощь при измерении шумов лазера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. В. Троицкий. Сравнение методов селекции продольных мод оптического резонатора.— ЖПС, 1970, т. 12, № 3.
2. Ю. В. Троицкий, В. П. Хюппенен. Перестройка и стабилизация частоты оптических квантовых генераторов с селективными потерями.— Автометрия, 1971, № 1.
3. Г. В. Галутва, А. И. Рязанцев. Резонатор с термокомпенсационной стабилизацией для газового лазера.— В сб. «Квантовая электроника», № 2. М., «Советское радио», 1971.
4. М. И. Захаров, Ю. В. Троицкий. Частотные свойства оптического резонатора с поглощающей пленкой.— Автометрия, 1971, № 1.
5. М. И. Захаров, Ю. В. Троицкий. К расчету оптического резонатора с поглощающей пленкой.— Радиотехника и электроника, 1970, т. 15, № 12.
6. М. И. Захаров, Ю. В. Троицкий. Расчет оптического резонатора с селекцией мод за счет поглощения и рассеяния света.— Оптика и спектроскопия, 1971, т. 30, № 3.
7. G. E. Moss. High-Power Single-mode He-Ne Laser.— Appl. Optics, 1971, v. 10, № 11.

*Поступила в редакцию
27 марта 1972 г.*