

И. М. БЕТЕРОВ, Ю. А. МАТЮГИН, Г. А. МИЛУШКИН,
Б. И. ТРОШИН, В. П. ЧЕБОТАЕВ

(Новосибирск)

**ВЫСОКОСТАБИЛЬНЫЙ ГАЗОВЫЙ ЛАЗЕР
НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ
($\lambda = 0,63$ мкм), Ч. 4
ЭЛЕКТРОННАЯ СХЕМА АВТОПОДСТРОЙКИ
ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАЦИИ ЛАЗЕРА**

Электронная часть системы стабилизации частоты лазера должна наиболее полно удовлетворять требованиям, отвечающим возможности получения стабильности, которая близка к предельно достижимой и пол которой понимается стабильность, ограниченная дробовыми шумами фотоприемника в заданной полосе частот [1, 2].

В системе, блок-схема которой показана на рис. 1, снижение стабильности возможно за счет: ухудшения отношения сигнал/шум электронной схемой, нескомпенсированности шумов разряда, динамической ошибки системы, статической ошибки системы, дрейфа нулей синхронного детектора и интегратора.

Сведение к минимуму перечисленных ошибок достигается правильным выбором общего статического коэффициента усиления разомкнутой системы и его рациональным распределением по узлам системы. Статический коэффициент усиления разомкнутой системы равен

$$K = S_{н.ф} K_{иу} K_{сд} K_{и} K_{к},$$

где $S_{н.ф}$ — коэффициент преобразования частоты резонатора в напряжение на нагрузке фотоприемника (крутизна оптического дискриминатора); $K_{иу}$ — коэффициент усиления избирательного усилителя; $K_{сд}$ — коэффициент передачи синхронного детектора; $K_{и}$ — коэффициент передачи интегрирующего усилителя; $K_{к}$ — коэффициент преобразования напряжения в частоту лазера пьезокерамикой.

Выбор величины статического коэффициента усиления разомкнутой системы обусловлен наибольшей расстройкой резонатора нестабилизированного лазера за 8 ч непрерывной работы (температурный дрейф длины резонатора), составляющей в нашем случае $80 \cdot 10^6$ Гц, и допустимой статической ошибкой системы. Эта ошибка может быть сделана достаточно малой за счет увеличения коэффициента усиления разомкнутой системы. Примем величину статической ошибки системы равной

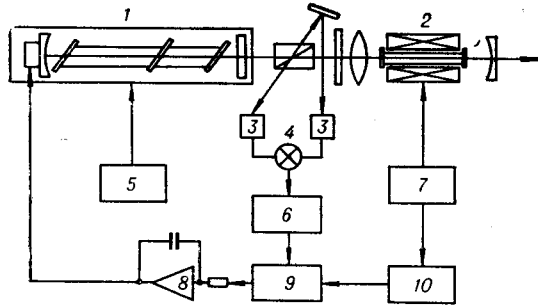


Рис. 1. Блок-схема стабилизации частоты лазера: 1 — ОКГ; 2 — соленоид; 3 — фотоприемник; 4 — вычитающее звено; 5 — стабилизатор для питания катушек магнитострикции; 6 — избирательный усилитель; 7 — опорный генератор; 8 — интегрирующий усилитель; 9 — синхронный детектор; 10 — фазовращатель.

одной десятой ошибки соответствующей предельно достижимой стабильности, т. е.

$$\Delta\omega_{\text{ст}} = \frac{\nu}{10S_{\text{н}}} = \frac{5 \cdot 10^{14}}{10 \cdot 10^{11}} = 500 \text{ Гц},$$

где ν — частота генерации лазера; $S_{\text{н}}$ — предельно достижимая стабильность.

Тогда величина статического коэффициента усиления разомкнутой системы равна

$$K = \frac{\Delta\omega}{\Delta\omega_{\text{ст}}} = \frac{80 \cdot 10^6}{500} = 1,6 \cdot 10^5,$$

и, следовательно, электронная часть системы должна иметь коэффициент усиления

$$K_{\text{э.ч}} = \frac{K}{S_{\text{н.ф}} K_{\text{н}}} = K_{\text{иу}} K_{\text{сд}} K_{\text{н}} = \frac{1,6 \cdot 10^5}{10^6 \cdot 2,5 \cdot 10^{-10}} = 6,4 \cdot 10^8,$$

где

$$S_{\text{н.ф}} = M P_0 \mu R_{\text{н}} = 10^{-9} \cdot 10^{-3} \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 10^4 = 2,5 \cdot 10^{-10};$$

M — чувствительность оптического дискриминатора ($M = 10^{-9}$ с); P_0 — мощность падающего излучения лазера на фотоприемник ($P_0 \approx 1$ мВт); μ — чувствительность фотоприемника ($\mu \approx 2,5 \cdot 10^{-2}$ А/В); $R_{\text{н}}$ — сопротивление нагрузки фотоприемника ($R_{\text{н}} = 10$ кОм).

Сопротивление нагрузки фотоприемника выбрано равным 10 кОм; увеличение его приводит к насыщению фотоприемника, так как, помимо полезной переменной мощности, на фотоприемник подается значительная постоянная мощность засветки, не несущая информации о расстройке лазера.

Для уменьшения влияния дрейфов нулей синхронного детектора и интегратора желательно усиление электронной части системы сосредоточить в избирательном усилителе. Исходя из этого оказывается рациональным принять коэффициент усиления избирательного усилителя равным 10^4 .

В нашей системе были реализованы следующие значения статических коэффициентов усиления элементов схемы:

$$K_{\text{иу}} = 10^4; \quad K_{\text{сд}} = 1; \quad K_{\text{ст.н}} = 75 \cdot 10^3.$$

В соответствии с этими значениями коэффициентов усиления величина статической ошибки регулирования вследствие расстройки длины резонатора (принятой 80 МГц) становится равной $\Delta\omega_{ст} = 0,4$ кГц.

Вычислим ошибки, связанные с дрейфом нуля синхронного детектора (а) и интегратора (б): а) синхронного детектора $\Delta U_{сд} = \pm 5$ мВ; б) интегрирующего усилителя $\Delta U_{и} = \pm 25$ мВ. Соответственно получим:

$$\Delta\omega_{сд} = \frac{\Delta U_{сд}}{S_{н.ф}K_{иу}} \approx 2 \cdot 10^3 \text{ Гц}; \quad \Delta\omega_{и} = \frac{\Delta U_{и}}{S_{н.ф}K_{иу}K_{сд}} \approx 10^4 \text{ Гц}.$$

Видно, что статические ошибки системы хорошо удовлетворяют требованию к системе регулирования. Эксперименты показали, что основным источником шума в системе регулирования являются разрядные шумы внешней ячейки. По нашим измерениям компенсация флюктуаций лазерного излучения ухудшается в среднем в несколько раз после включения ячейки и зависит главным образом от давления в ячейке и тока разряда. При выключенной ячейке остаточный шум на выходе фотодетектора ФД-7К примерно в два раза больше уровня дробового шума фотодиода. Вследствие этого уровень шума резонансного усилителя оказывается малым на фоне нескомпенсированных шумов фотодетекторной приемной системы. Следовательно, для данной системы снижение предельно достижимой стабильности происходит в основном за счет разрядных шумов внешней ячейки и оценивается по величине фактором $4 \div 6$.

Следует отметить, что при использовании высокочастотного возбуждения газоразрядных трубок уровень шума снижается, как показывают экспериментальные измерения, до уровня дробовых шумов.

Динамические свойства системы определяются ее амплитудно-фазовым годографом. Известно, что при статистическом характере возмущающих воздействий на входе системы и при условиях, что спектр шума значительно больше частотной полосы возмущений, аддитивности помехи и некоррелированности помехи и сигнала, амплитудно-частотная характеристика коэффициента усиления разомкнутой системы должна примерно совпадать с частотным спектром возмущающего воздействия [3]. Это дает минимизацию среднеквадратичной ошибки. Понятно, что спектр возмущений зависит от конкретных условий, в которых находится установка, и в принципе может измениться при изменении характера окружающей среды. Обычно спектр технических флюктуаций спектральной плотности частоты генерации имеет зависимость типа $1/f^a$ [4], где f — частота наблюдения, и в этом случае компромиссное решение динамического коэффициента усиления системы достаточно хорошо реализуется на основе интегрирующего усилителя. Кроме того, при таком структурном решении системы регулирования по динамическим свойствам упрощается стабилизация частоты системы путем расширения полосы входного усилителя и синхронного детектора, причем определяющим звеном в формировании частотной характеристики является интегрирующий усилитель. В наших условиях наилучшие результаты были получены с постоянной времени интегрирующего усилителя, равной $\tau_{и} = 75$ с, что дает снижение амплитуды возмущающего воздействия на частоте 50 Гц примерно в 30 раз.

Поскольку для работы системы необходимо отфильтровывать из выходного сигнала синхронного детектора составляющие сигнала с основной несущей частотой и ее гармониками, не внося при этом излишне большого фазового сдвига, желательно иметь высокую несущую частоту, так как это упрощает проблему фильтрации и облегчает достижение устойчивости и широкополосности цепи. Не принципиальный, но важный в практическом отношении предел в повышении несущей частоты обус-

ловлен техническими трудностями получения модулированного магнитного поля высокой частоты. С учетом этого частота несущей была выбрана 14 кГц.

Основными компонентами системы стабилизации частоты лазера, определяющими ее инерционность, являются: избирательный усилитель с $\tau_{иу} = 5 \cdot 10^{-4}$ с, фильтр синхронного детектора с $\tau_{ф} = 3,33 \cdot 10^{-5}$ с и интегрирующий усилитель с $\tau_{и} = KRC = 75$ с, где $RC = \tau = 10^{-3}$ — постоянная времени интегрирующей цепочки усилителя; K — статический коэффициент усиления интегрирующего усилителя. Инерционностью остальных элементов системы (фотоприемник и пьезокерамика) можно пренебречь.

Анализ устойчивости выполнен методом логарифмических амплитудно-частотных характеристик (ЛАЧХ) [5]. На рис. 2 показана ЛАЧХ разомкнутой системы регулирования. ЛАЧХ со стороны низких частот имеет наклон 20 дБ на декаду, частота среза оказывается равной $9 \cdot 10^3$ 1/с или 1430 Гц. Наклон характеристики изменяется с 20 дБ на декаду на наклон в 40 дБ на декаду на частоте

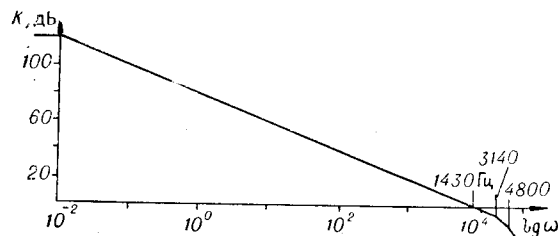


Рис. 2.

3140 Гц, т. е. превышающей частоту среза более чем в 2 раза. Как известно, такая амплитудно-частотная характеристика соответствует устойчивой системе с необходимым запасом по фазе и амплитуде. Частота, с которой начинают проявляться инерционные свойства избирательного усилителя, соответствует 3140 Гц, а фильтра синхронного детектора 4800 Гц.

Помимо выполнения условий устойчивости на частотах рабочей полосы системы, должно быть выполнено условие устойчивости на несущей частоте:

$$S_{н.ф} K_{иу} K_{сд} K_{фсд} K_{и} K_{к} \leq 1,$$

где $K_{фсд}$ — коэффициент передачи фильтра синхронного детектора. Определим максимально допустимый коэффициент $K_{фсд}$ на несущей частоте, при котором система еще устойчива:

$$K_{фсд} \leq \frac{1}{S_{н.ф} K_{иу} K_{сд} K_{и} K_{к}}.$$

В правой части последнего выражения не вычислен коэффициент передачи интегратора $K_{и}$ на частоте 14 кГц:

$$K_{и} = \frac{K}{\sqrt{1 + (1 + K)^2 \omega^2 \tau^2}} \approx \frac{1}{\omega \tau} = 1,13 \cdot 10^{-2}.$$

Подставив значение $K_{и}$ в выражение для коэффициента передачи фильтра синхронного детектора, получим, что устойчивость по несущей обеспечивается без подавления ее фильтром синхронного детектора.

В заключение заметим, что строгое проектирование системы регулирования должно основываться на экспериментальных измерениях спектральной плотности флюктуаций частоты генерации лазера, спектральной плотности шума и корреляции сигнала и шума. Заметим, также, что определенные технические трудности реализации систем регулирования могут возникнуть вследствие существования механических резонансов арматуры резонатора и пьезокерамики в условиях сильных акустических и механических возмущений.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. М. Бетеров, Ю. А. Матюгин, Г. А. Милушкин, Б. И. Трошин, В. П. Чеботаев. Высокостабильный газовый лазер на основе нелинейного поглощения ($\lambda=0,63$ мкм), ч.1. Методы стабилизации частоты мощных газовых лазеров.— Автометрия, 1972, № 5.
2. A. D. White. Frequency Stabilization of Gas Lasers.— IEEE Journal of Quantum Electronics, 1965, v. QE-1, № 8.
3. Л. А. Вайнштейн, В. Д. Зубков. Выделение сигналов на фоне случайных помех. М., «Советское радио», 1960.
4. А. Н. Малахов. Флуктуации в автоколебательных системах. М., «Наука», 1968.
5. Техническая кибернетика. Под ред. В. В. Солодовникова. М., «Машиностроение», 1967.

*Поступила в редакцию
24 декабря 1971 г.*
