

Ю. В. ТРОИЦКИЙ, В. П. ХЮППЕНЕН  
(Новосибирск)

### ПЕРЕСТРОЙКА И СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ ОПТИЧЕСКИХ КВАНТОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С СЕЛЕКТИВНЫМИ ПОТЕРЯМИ

Для оптической связи, голографии, метрологии и ряда других применений представляет интерес создание одночастотных, стабильных по частоте оптических квантовых генераторов (ОКГ). Одночастотный режим работы ОКГ часто получают, применяя короткие резонаторы [1]. Однако уменьшение длины резонатора обычно приводит к уменьшению объема активной среды и, следовательно, к снижению выходной мощности. Кроме того, в ряде случаев, например для аргонового лазера, получение одночастотного режима работы таким методом затруднено из-за большой доплеровской ширины лазерного перехода и особенностей конструкции разрядной трубки.

Надежный способ достижения генерации на одной частоте в лазерах большой длины заключается в использовании резонаторов с селективными потерями, обеспечивающих значительное снижение добротности всех видов колебаний, кроме одного, генерацию на котором хотят получить. Примером устройств такого типа являются резонаторы, использующие тонкие поглощающие или рассеивающие свет пленки [2, 3], которые позволяют создать одночастотные ОКГ высокой мощности. Эта система (рис. 1, а) состоит из двух зеркал 1 и 2 и расположенной вблизи одного из зеркал прозрачной пластины 4, сторона А которой просветлена, а на другую сторону В нанесено тонкое поглощающее или рассеивающее свет покрытие. Частота генерации в таком случае определяется частотой выделяемого вида колебаний, для которого пленка находится в узле электрического поля стоячей волны [2] или минимальны дифракционные потери [3]. Поэтому изменение длины селектора  $l$  приводит к последовательной генерации продольных видов колебаний и, следовательно, к изменению частоты скачками. При перестройке длины резонатора  $L$  частота меняется в пределах межмодового расстояния  $\Delta \nu = \frac{c}{2L}$  ( $c$  — скорость света), которое для длинных резонаторов невелико. Таким образом, регулировка только длины резонатора или только длины селектора приводит к скачкообразному изменению частоты генерации; значительно изменяется и амплитуда колебаний. Это затрудняет частотную стабилизацию ОКГ, для которой в ряде случаев необходима плавная регулировка частоты при любых длинах  $l$  или  $L$ . Необходимым усло-

вием плавной перестройки частоты генератора является синхронное изменение длины резонатора и длины селектора, причем селектирующая пленка должна все время находиться в узле выделяемого вида колебаний.

На рис. 1, а показана схема, позволяющая осуществить это условие. Регулирующее частоту напряжение  $U_1$  прикладывается к пьезокерамике 5, изменяющей длину резонатора. К пьезокерамике 6, которая перемещает прозрачную пластину 4 с селектирующей пленкой В, прикладывается только часть этого напряжения

$$U_2 = U_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2},$$

где  $R_1$  и  $R_2$  — сопротивления делителя. Пусть при  $U_1=0$  пленка находилась в узле стоячей волны. Тогда изменение длины резонатора при приложенном напряжении  $U_1$  составит

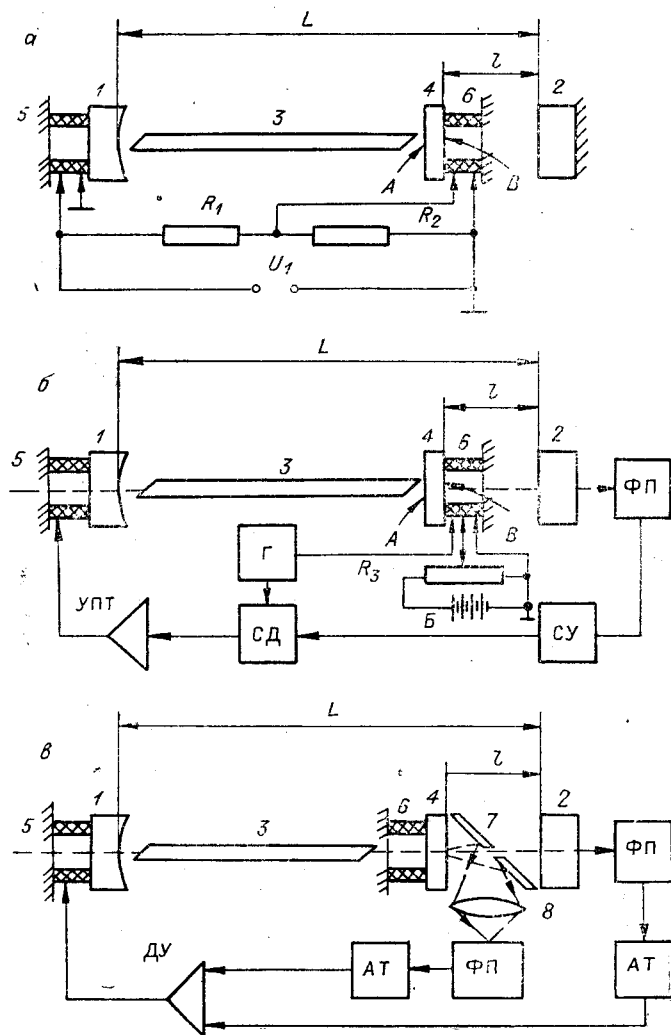
$$\Delta L = k_1 U_1,$$

а изменение длины селектора —

$$\Delta l = k_2 U_2,$$

Рис. 1. Устройства для стабилизации частоты ОКГ:

1 и 2 — зеркала резонатора; 3 — трубка с активным веществом; 4 — прозрачная пластина с просветлением А и селектирующим покрытием В; 5 и 6 — пьезокерамика; 7 — отклоняющее зеркало; 8 — линза; ФП — фотоприемник; СУ — селективный усилитель; СД — синхронный детектор; УПТ — усилитель постоянного тока; АТ — регулируемые аттенюаторы; ДУ — дифференциальный усилитель;  $L$  и  $l$  — оптические длины резонатора и селектора;  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  — сопротивления; Б — батареи.



где  $k_1$  и  $k_2$  — коэффициенты пропорциональности между напряжениями, приложенными к пьезокерамике 5 и 6, и перемещениями зеркала 1 и селектирующей пленки В соответственно. Для того чтобы пленка оставалась в узле, необходимо

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta l}{l}$$

и, следовательно,

$$\frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{k_2 L}{k_1 l}.$$

Пьезокерамики должны быть линейны, т. е.  $k_1 = \text{const}$ ,  $k_2 = \text{const}$ .

Из-за различных нестабильностей в процессе работы генератора (изменение температуры и давления, непостоянство статических деформаций конструкции и т. д.)  $L$  и  $l$  могут меняться неконтролируемым образом, независимо от напряжений на пьезокерамиках. Поэтому необходимо периодически подстраивать схему, совмещая узел поля с пленкой. В практически наиболее важном случае эта нестабильность связана с изменением окружающей температуры. Покажем, что при стабилизации частоты по спектральной линии возможен такой подбор  $R_1$  и  $R_2$ , при котором поглощающая пленка все время оказывается в узле, независимо от колебаний температуры. Так как  $L$  и  $l$  меняются и вследствие температурного дрейфа, и из-за приложения к пьезокерамикам напряжений, то

$$\Delta L = \alpha_L L \Delta T - k_1 U_1; \quad \Delta l = \alpha_l l \Delta T - k_2 U_2,$$

где  $\Delta T$  — изменение температуры;  $\alpha_L$  и  $\alpha_l$  — средние температурные коэффициенты линейного расширения деталей резонатора и селектора соответственно;  $U_1$  — в этом случае управляющий сигнал схемы стабилизации частоты. Частота стабильна, и пленка остается в узле поля, если  $\Delta L = \Delta l = 0$ . Тогда

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\alpha_L L k_2}{\alpha_l l k_1},$$

откуда

$$\frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{\alpha_L L k_2}{\alpha_l l k_1}.$$

Следовательно, подводимые к пьезокерамикам напряжения при  $k_1 = k_2$  пропорциональны не длинам  $L$  и  $l$ , а тепловым удлинениям  $\alpha_L L$  и  $\alpha_l l$  соответствующих частей резонатора. При практическом осуществлении предлагаемой схемы необходимо обратить внимание на то, что арматура лазера должна обладать хорошей теплопроводностью, обеспечивающей отсутствие заметного градиента температуры.

Таким образом, устройство (см. рис. 1, а) позволяет осуществить или только плавную перестройку частоты, или только стабилизацию по атомной линии, причем в первом случае необходима периодическая подстройка системы, а во втором — устраняются не все причины нестабильности.

Применение автоматической подстройки длины резонатора (см. рис. 1, б) позволяет избавиться от недостатков системы (см. рис. 1, а). Смещение селектирующей пленки из узла поля вызывает рост вносимых ею потерь [4] и, следовательно, падение мощности генерации. Поэтому если положение узла поля не совпадает с положением пленки, то при подаче на пьезокерамику б сканирующего напряжения частоты  $\Omega$  от генератора Г выходная мощность, регистрируемая фотоприемником ФП, будет иметь составляющую этой частоты. Ее амплитуда и фаза несут информацию о величине и знаке относительной расстройки резонатора и селектора. Выходной сигнал с фотоприемника подводится к синхронному детектору СД, а затем — к пьезокерамике б. Когда положения узла поля и пленки совпадают, т. е. когда потери, вносимые селектором, минимальны, составляющая частоты  $\Omega$  в выходной мощности отсутствует и напряжение на выходе усилителя постоянного тока (УПТ) равно нулю. Частота генерации схемы определяется длиной селектора  $l$  и может меняться в широких пределах потенциометром  $R_3$ . Поэтому такую систему можно использовать как для широкодиапазонной перестройки частоты генератора, так и для ее стабилизации.

Устройство (см. рис. 1, б) соответствует широко известному методу стабилизации ОКГ по внешнему пассивному резонатору (см., например, [5, 6]), причем частотным дискриминатором в этом случае является селектор, образованный зеркалом 2 и селективирующей пленкой. Так как отрезок  $l$ , определяющий частоту генерации, не содержит активной среды, то его можно сделать весьма стабильным. Селектор может быть собран из деталей с малым коэффициентом теплового расширения или выполнен в виде термокомпенсированной конструкции. Кроме того, могут быть применены системы теплоизоляции или автоматической регулировки температуры деталей селектора. Применение этих методов может обеспечить стабильность частоты, например, не хуже  $10^{-8}$ — $10^{-9}$  за время порядка десятков минут [5, 6]. Селектор более стабилен при использовании рассеивающего свет покрытия, так как поглощающий слой может слегка нагреваться как когерентным полем выделяемого вида колебаний, так и спонтанным излучением активного вещества лазера. Следует отметить, что сигнал с выхода УПТ можно подавать на пьезокерамику 6, а частоту генерации менять, подавая напряжение с потенциометра  $R_3$  на пьезокерамику 5. При этом частота генерации определяется длиной всего резонатора и трудно достичь ее высокой стабильности. Последнее замечание не существенно, если для получения высокой воспроизводимости частоты генератор в дальнейшем стабилизируется по атомной линии любым из известных способов.

В схеме рис. 1, б из-за сканирования длины селектора выход ОКГ, как правило, промодулирован и по частоте и по амплитуде. Можно изготовить селективирующее покрытие, которое при небольшом смещении из узла поля не меняет частоты генерации [4], и таким образом устранить частотную модуляцию. Однако нежелательная амплитудная модуляция небольшой величины остается и в этом случае. Известна схема [7] с использованием селектора Смита, в которой отсутствует этот недостаток. Применение рассеивающих свет селективирующих пленок дает возможность создать аналогичное устройство (см. рис. 1, в).

Свет, рассеянный селективирующей пленкой, отклоняется зеркалом 7 и линзой 8 собирается на фотоприемнике ФП. На рис. 2 показана типичная зависимость рассеянной (внизу) и выходной (вверху) мощностей от длины селектора  $l$ . Мощность генерации максимальна, когда пленка вносит минимальные потери, т. е. когда минимально рассеяние. При отстройке от этого положения выходная мощность падает, а рассеянная вначале увеличивается, а затем тоже падает. Из рис. 2 видно, что при некоторых значениях  $l$  параметры  $\frac{\partial P_{\text{вых}}}{\partial l}$  и  $\frac{\partial P_p}{\partial l}$  ( $P_{\text{вых}}$  — мощность выхода, а  $P_p$  — рассеянная мощность) имеют разные знаки. Это и дает возможность осуществить схему рис. 1, в. На дифференциальном усилителе ДУ происходит сравнение выходной и рассеянной мощностей, и разностный сигнал подается на пьезокерамику 5. Необходимый уровень выходной и рассеянной мощностей устанавливается регулируемым затенителем АТ. Таким образом, слежение не сопровождается амплитудной модуляцией выхода. Частота генерации, как и в случае использования схемы рис. 1, б, определяется

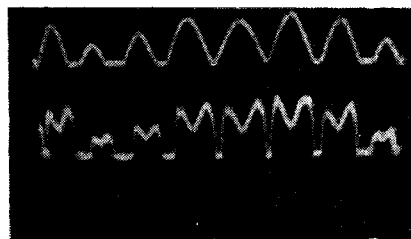


Рис. 2. Зависимость выходной (вверху) и рассеянной (внизу) мощностей от длины селектора для резонатора с рассеивающим свет селектором.

длиной селектора  $l$ , который может быть сделан стабильным и регулируемым.

Описанные выше схемы позволяют сделать ОКГ со сложным резонатором такими же простыми в управлении, как и лазеры, в которых одночастотный режим достигается за счет уменьшения длины. Сочетание этих характеристик с повышенной мощностью излучения на одной частоте делает такие схемы полезными в технических приложениях и при проведении физических исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. E. I. Gordon, A. D. White. Single Frequency Gas Lasers at 6328 Å.— Proc. IEEE, 1964, v. 52, № 2.
2. Ю. В. Троицкий, Н. Д. Голдина. О выделении одного типа колебаний в оптическом резонаторе.— Письма в редакцию ЖЭТФ, 1968, т. 7, № 2.
3. Ю. В. Троицкий. Тонкослойная дифракционная решетка в оптическом резонаторе стоячей волны.— Оптика и спектроскопия, 1969, т. 27, вып. 3.
4. Ю. В. Троицкий. Оптический резонатор с поглощающей металлической пленкой.— Радиотехника и электроника, 1969, т. 14, № 9.
5. А. Д. Степанов. Стабилизация частоты и частотные флуктуации гелий-неонового лазера.— ИВУЗ, Радиофизика, 1968, т. 11, № 4.
6. A. D. White. Frequency Stabilisation of Gas Lasers.— IEEE, Journ. of Quant. Electronics, 1965, v. QE — 1, № 8.
7. T. Tajima, Y. Cho and Y. Matsu o. A Composite-Cavity Tunable Laser.— Applied Optics, 1969, v. 8, № 7.

*Поступила в редакцию  
20 августа 1970 г.*