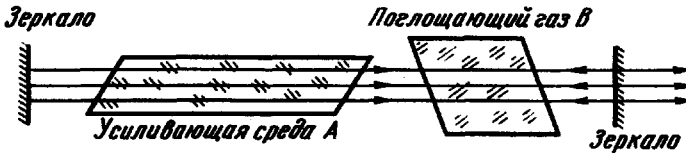


**АВТОСТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ СВЕТОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ЛАЗЕРА
НЕЛИНЕЙНЫМ ПОГЛОЩЕНИЕМ В ГАЗЕ**

В.С.Летохов

1. Известно, что для создания квантового генератора с высокой стабильностью частоты колебаний (стандарта частоты) необходимо иметь узкий резонанс усиления активной среды со стабильным положением мак-

симула резонанса и широкий резонанс потерь в резонаторе. Этот принцип лежит в основе стандартов частоты радио [1,2] – и оптического [3] диапазонов. В настоящем письме предлагается принципиально другой метод стабилизации частоты лазера, который основан на возникновении



в поле стоячей волны лазера узкого резонансного "провала" в линии поглощения газа, помещенного в резонатор, при широком и менее стабильном резонансе усиления активной среды. Предложенный метод представляет интерес для создания оптического стандарта частоты.

2. Пусть газ низкого давления находится в поле стоячей световой волны $E e^{i\omega t} \cos kz$, частота которого совпадает с линией резонансного поглощения газа на частоте ω_b . В "слабом" световом поле, не вызывающем насыщения поглощения газа, форма линии поглощения является доплеровской. В "сильном" световом поле происходит насыщение поглощения атомов, наиболее эффективно взаимодействующих с полем стоячей волны. В результате, форма линии поглощения существенно изменяется и, если доплеровская ширина линии значительно больше однородной ширины, на частоте ω и зеркальной ей относительно ω_b частоте $2\omega_b - \omega$ выжигаются "дырки". Коэффициент поглощения стоячей световой волны приобретает "провал" на частоте ω_b , из-за совпадения зеркально-симметричных "дырок" при $\omega = \omega_b$. Это явление было подробно изучено Лэмбом [4] для случая усиливающей газовой среды и носит название лэмбовского "провала".

Если газ имеет низкое давление, а вероятность радиационного перехода поглощающих атомов A_{21}^b мала, "провал" в линии поглощения может быть весьма узок. Ширина его $\Delta\omega_b$ определяется временем пролета атомов через луч $\tau_0 = d/v_0$ (d – диаметр луча, v_0 – средняя скорость атомов) и уширением линии за счет столкновений $\Delta\omega_{ст}$:

$$\Delta\omega_b = \frac{1}{\tau_0} + \Delta\omega_{ст}, \quad (1)$$

если $A_{21}^b \ll 1/\tau_0$. Например, при давлении газа 10^{-2} торр, когда обычно $\Delta\omega_{ст} \approx 10^4 \div 10^5$ ч, для луча диаметром $d \approx 1$ см ($v_0 \approx 10^5 \div 10^6$ см/сек) ширина "провала" $\Delta\omega_b \approx 2 \cdot 10^4 \div 2 \cdot 10^5$ ч.

3. Пусть в резонаторе лазера находится кювета с поглощающим газом, линия поглощения которого на частоте ω_b совпадает с линией усиления активной среды на частоте ω_a (рисунок). При достаточном превышении накачки над порогом, когда образуется "провал" в линии поглощения, частота генерации ω автоматически стабилизируется в области минимума потерь на частоте "провала" ω_b . Переход в режим автостабили-

зации достигается, если частота генерации ω поддерживается в пределах "провала" ($|\omega - \omega_b| \lesssim \Delta\omega_b$). Если активная среда лазера имеет доплеровскую неоднородную линию уширения с шириной $\Delta\omega_{\text{доп}}$ и однородной шириной $\Delta\omega_a \ll \Delta\omega_{\text{доп}}$, то условия автостабилизации имеют следующий вид:

$$S_1 = \frac{1}{p_b} \frac{\Delta\omega_b}{kc}, \quad S_2 = \frac{1}{p_b} \frac{a}{k} \frac{\Delta\omega_b}{\Delta\omega_{\text{доп}}}, \quad S_3 = \frac{aa}{kb} \frac{\Delta\omega_b}{\Delta\omega_a} \ll 1, \quad (2)$$

где c – скорость света; $p_a = a E^2$, $p_b = b E^2$ – параметры насыщения усиления и поглощения, соответственно; a, k – коэффициенты усиления и поглощения на единицу длины, соответственно. Частота генерации ω в режиме автостабилизации определяется выражением:

$$\omega = \omega_b + S_1 (\Omega - \omega_b) + (S_2 - S_3) (\omega_a - \omega_b), \quad (3)$$

где Ω – частота резонатора. В случае активной среды с однородной линией усиления выражение (3) остается справедливым, если в S_2 заменить доплеровскую ширину на однородную $\Delta\omega_a$ и положить $S_3 = 0$. Выражение (3) получено в предположении $p_a, p_b \ll 1$, но эффекты автостабилизации существуют и при больших значениях параметров насыщения*. Из (2) и (3) следует, что стабилизирующее действие поглощающего газа объясняется возникновением узкого "провала" с шириной $\Delta\omega_b \ll \Delta\omega_a, kc, \Delta\omega_{\text{доп}}$, за счет которого параметры $S_1, S_2, S_3 \ll 1$.

4. Для осуществления предложенного лазера необходимо подобрать атомы или молекулы, обладающие линией поглощения на частоте излучения лазера непрерывного действия. Укажем на следующие две возможные пары: 1) линия 3,3913 мк He – Ne лазера совпадает с линией поглощения 2947,906 см⁻¹ молекулы CH₄ с точностью 0,003 см⁻¹ при коэффициенте поглощения $k = 0,17$ см⁻¹/тор и $\Delta\omega_{\text{ст}} = 5$ мк/тор [5]; 2) линия 3,5070 мк He – Xe лазера совпадает с линией поглощения 2850,808 см⁻¹ молекулы H₂CO с точностью 0,007 см⁻¹ при $k \approx 0,1$ см⁻¹/тор [6]. При давлении газа 10⁻² тор можно получить глубокий "провал" с шириной $\Delta\omega_b \approx 5 \cdot 10^4$ мк под действием поля с интенсивностью 10⁻² ст/см².

В качестве поглощающих молекул в ряде случаев можно использовать молекулы активной среды при отсутствии возбуждения, так как условие совпадения частот усиления и поглощения в этом случае выполняется автоматически.

Приведенные примеры поглощающих молекул являются далеко не оптимальными, так как для них $A_{21}^b \approx \text{сек}^{-1}$. Наиболее выгодны атомы или молекулы с $A_{21}^b \approx 10^3 \cdot 10^5 \text{ сек}^{-1}$. При таких значениях A_{21}^b можно использовать весьма низкие давления поглощающего газа ($\sim 10^{-4}$ тор), что гарантирует высокую стабильность положения линии поглощения ω_b . При столь низких давлениях длина свободного пробега составляет десятки сантиметров и, следовательно, при многократном пропускании луча через поглощающий газ строго параллельно самому себе за счет молекул, пересекающих последовательно несколько лучей, можно получить

весьма узкий "провал" с шириной $\Delta\omega_b \approx 10^3$ Hz . Кроме того, при $A_2^{(b)} \approx 10^3 \div 10^5 \text{ сек}^{-1}$ существенно снижается мощность, необходимая для образования "провала".

5. Вполне реально получение "провала" поглощения с шириной $\Delta\omega_b \approx 10^5$ Hz и стабилизация частоты резонатора Ω и частоты линии усиления ω_a с точностью 10^{-9} . В этом случае при $p_b \approx 0,1 \div 0,3$ и $\Delta\omega_a, k \approx 10^8$ Hz можно ожидать стабильности частоты генерации ω относительно ω_b порядка 10^{-11} . Поэтому абсолютная стабильность частоты генерации будет определяться стабильностью частоты линии поглощения ω_b . При низких давлениях газа ($10^{-3} \div 10^{-4}$ тор) стабильность центра линии поглощения будет определяться взаимодействием молекул со стенками кюветы и, по-видимому, может быть не хуже 10^{-11} .

Автор глубоко благодарен академику Н.Г.Басову за обсуждение и поддержку настоящей работы.

Физический институт им. П.И.Лебедева
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
16 июня 1967 г.

Литература

- [1] Н.Г.Басов, А.И.Прохоров. ЖЭТФ, 27, 431, 1954; J.P.Gordon, K.J.Zeiger, C.H.Townes. Phys.Rev., 95, 282, 1954.
- [2] H.M.Goldenberg, D.Kleppner, N.F.Ramsey. Phys.Rev.Lett., 5, 361, 1960.
- [3] Н.Г.Басов, В.С.Летохов. Письма ЖЭТФ, 2, 6, 1965.
- [4] W.E.Lamb, Jr. Phys. Rev., 134A, 1429, 1964.
- [5] B.N.Edwards, D.E.Burch. JOSA, 55, 174, 1965.
- [6] K.Sakurai, K.Shimoda, M.Takami. J.Phys. Soc. of Japan, 21, 1838, 1966.

* Результаты для случая сильного насыщения и условия устойчивости будут изложены в подробной публикации.