Доклады Академии наук СССР
1955. Том 101, № 1

ФИЗИКА

Н. Г. БАСОВ и А. М. ПРОХОРОВ

ТЕОРИЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО ГЕНЕРАТОРА И МОЛЕКУЛЯРНОГО УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

(Представлено академиком М. А. Леонтовичем 29 XI 1954)

Молекулярным генератором мы называем автоколебательную систему, использующую энергию, связанную с переходами между различными энергетическими уровнями молекул. Колебательным контуром молекулярного генератора является объемный резонатор. Через объемный резонатор пропускается молекулярный пучок, в котором частично или полностью отсутствуют молекулы на нижнем уровне используемого перехода.

Обратная связь в молекулярном генераторе осуществляется через электромагнитное поле резонатора, которое, воздействуя на дипольные моменты молекул, пролетающие через объемный резонатор, вызывает индуцированное излучение этих молекул. Для получения режима самовозбуждения резонатор должен иметь достаточно высокую добротность, чтобы мощность излучения молекул была больше мощности потерь в нагруженном резонаторе. Эффект насыщения при индуцированном излучении является той нелинейностью, которая определяет величину амплитуды установившихся колебаний в контуре молекулярного генератора.

Однако молекулярный генератор не аналогичен полностью другим генераторам с обратной связью, так как не является системой, работу которой можно описать при помощи законов классической физики, ибо индуцированное излучение является существенно квантовым эффектом. В отличие от других генераторов, в молекулярном генераторе колебательная энергия не вырабатывается в его контуре, а вносится в контур молекулами пучка, каждую из которых при рассмотрении можно представить как возбужденный колебательный контур, т. е. молекулярный генератор является системой с очень большим числом степеней свободы. Поэтому рассмотрение работы молекулярного генератора следует проводить статистическим квантовомеханическим методом. В настоящей статье это делается при помощи теории дисперсии с учетом эффекта насыщения ([1], [2]).

Отличительной особенностью молекулярного генератора является огромная стабильность частоты, так как частота генерации, в основном, определяется частотой используемой спектральной линии и слабо зависит от внешних условий. Поэтому молекулярный генератор может быть использован, с одной стороны, в качестве эталона частоты, а с другой стороны, как спектроскоп с высокой разрешающей силой.

Если условия самовозбуждения не выполнены, то такой прибор может служить усилителем микроволновой мощности с малым коэффициентом шума.

На принципиальную возможность создания молекулярного генера-

тора было указано в нашей статье [3]*. В настоящее время появилось сообщение о реализации такого генератора [4]. Следует отметить, что в этой заметке отсутствуют теоретические соображения о работе молекулярного генератора.

Резонатор молекулярного генератора, через который пролетает пучок молекул, преимущественно находящихся в верхнем состоянии используемого перехода, можно представить как резонатор, заполненный средой с отрицательными потерями. Эту среду можно характеризовать комплексной диэлектрической постоянной $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$:

$$\varepsilon' = 1 - A\gamma \frac{\omega}{\omega_2} \frac{(\omega - \omega_2)\tau}{(\omega - \omega_2)^2 + \frac{1}{\tau^2} + \gamma |E|^2}, \tag{1}$$

$$\varepsilon'' = - A\gamma \frac{\omega}{\omega_2} \frac{1}{(\omega - \omega_2)^2 + \frac{1}{\tau^2} + \gamma |E|^2}, \tag{2}$$

где

$$A = \frac{4\pi\hbar N_0}{Sl}; \tag{3}$$

$$\gamma = |d_{z_n}^m|^2/\hbar^2; \tag{4}$$

ω_2 — частота спектральной линии; τ — среднее время пролета молекулами поля излучения резонатора; N_0 — разность между числом молекул на верхнем и нижнем уровнях используемого перехода, пролетающих через резонатор в 1 сек.; S — площадь поперечного сечения резонатора; l — длина резонатора; E — напряженность электрического поля в резонаторе.

Если пренебречь зависимостью эффекта насыщения от координат точек сечения резонатора, то для напряженности электрического поля внутри резонатора можно написать следующее уравнение:

$$\frac{d^2E}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q}\frac{dE}{dt} + \frac{\omega_0^2}{\varepsilon} E = 0, \tag{5}$$

где ω_0 — резонансная частота резонатора, Q — добротность резонатора.

Считая, что $E = E_0 e^{i\omega t}$, $\frac{\omega_0 - \omega_2}{\omega_0} \ll 1$, и пренебрегая при решении членами $\left(\frac{Q}{\omega_0\tau}\right)^2$, получим следующие выражения для частоты и амплитуды установившихся колебаний:

$$\omega = \omega_2 \left[1 - \frac{2Q}{\omega_2\omega_0\tau}(\omega_0 - \omega_2)\right], \tag{6}$$

$$E_0^2 = \frac{QA\gamma\tau^2 \frac{\omega_0}{\omega_2} - 1 - \frac{4(\omega_2 - \omega_0^2 Q^2)}{\omega_0^2}}{\gamma\tau^2}. \tag{7}$$

Режим самовозбуждения получается, если

$$QA\gamma\tau^2 > 1; \tag{8}$$

это условие было получено нами в работе [3].

---

* Первый доклад относительно принципиальной возможности создания молекулярного генератора был сделан авторами настоящей статьи в мае 1952 г. на Общесоюзной конференции по радиоспектроскопии.

Мощность, которую может отдать молекулярный генератор, равна

$$W = \frac{\omega |E|^2 Sl}{8\pi Q}. \tag{9}$$

Если $QA\gamma\tau^2 \gg 1$, то

$$W = {}^1/_2 N_0 \hbar\omega, \tag{10}$$

т. е. половина молекул переходит с верхнего уровня на нижний, отдавая энергию в резонатор. Очевидно, что это есть максимальная мощность, которую может отдать молекулярный генератор. Для того чтобы снять с молекулярного генератора мощность, близкую к максимальной, добротность ненагруженного резонатора должна быть значительно больше, чем нагруженного.

Если условие (8) не выполнено, то такой прибор может быть использован в качестве усилителя мощности с малым коэффициентом шума. Такой прибор аналогичен регенеративному приемнику.

Работа усилителя описывается уравнением

$$\frac{d^2E}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q}\frac{dE}{dt} + \frac{\omega_0^2}{\varepsilon}E = B\omega^2 e^{i\omega t}. \tag{11}$$

Усилитель имеет полосу пропускания $\sim 1/\tau$ и его коэффициент усиления по мощности равен

$$k = \varkappa \frac{Q^2}{(1 - A\gamma\tau^2 Q)^2}, \tag{12}$$

где $\varkappa$ — постоянная, зависящая от согласования подводящей и отводящей микроволновой линий с резонатором усилителя. Если добротность ненагруженного резонатора значительно больше добротности нагруженного линиями, то максимальное значение $\varkappa = {}^1/_2$.

Для того чтобы усилитель работал в линейной области (вдали от эффекта насыщения), необходимо, чтобы выполнялось условие

$$\gamma\tau^2 |E_0|^2 \ll 1.$$

В заключение авторы выражают благодарность акад. В. А. Котельникову за ценные замечания, касающиеся работы молекулярного генератора.

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

Поступило
26 XI 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] Л. Ландау, Е. Лифшиц, Квантовая механика, ч. 1, 1948, стр. 170—172. [2] R. Karplus, J. Schwinger, Phys. Rev., **73**, 1020 (1948). [3] Н. Г. Басов, А. М. Прохоров, ЖЭТФ, **27**, в. 4 (10), 431 (1954). [4] J. P. Gordon, H. J. Zeiger, C. H. Townes, Phys. Rev., **95**, 282 (1954).