

# О МОЛЕКУЛЯРНОМ ГЕНЕРАТОРЕ 4-ММ ДИАПАЗОНА НА ПУЧКЕ МОЛЕКУЛ ФОРМАЛЬДЕГИДА

А. Ф. Крупнов, В. А. Скворцов

Приводятся расчет и некоторые характеристики пучкового мазера на частоту 72838 мГц на переходе  $1_{01}-0_{00}$  молекулы  $\text{CH}_2\text{O}$ . Отсутствие тонкой структуры у используемой линии и вид штарк-эффекта, по-видимому, благоприятны для получения повышенной стабильности частоты. Измерена мощность молекулярного генератора, равная по порядку величины  $10^{-11}$  вт.

Круг веществ, используемых в пучковых молекулярных генераторах, ограничен. Это различные изотопные комбинации аммиака, атомарный водород и синильная кислота. Представляет интерес увеличение числа этих веществ и продвижение пучковых мазеров в более коротковолновый участок диапазона. Основная трудность при этом заключается в получении достаточного числа активных молекул. Нами проводились работы в этом направлении, которые завершились созданием молекулярного генератора на формальдегиде в 4-мм диапазоне [1, 2]. Ниже приводятся расчет и некоторые характеристики пучкового мазера на формальдегиде.

Молекула формальдегида  $\text{C}^{12}\text{H}_2\text{O}^{16}$  — легкий вытянутый, слегка асимметричный волчок с довольно большим дипольным моментом  $\mu_a = 2,31$  дебая (рис. 1а). Вращательные постоянные молекулы  $A = 282106$  мГц,  $B = 38834$  мГц и  $C = 34004$  мГц; параметр асимметрии Рэя

$$\kappa = \frac{2B - A - C}{A - C} \approx -0,961.$$

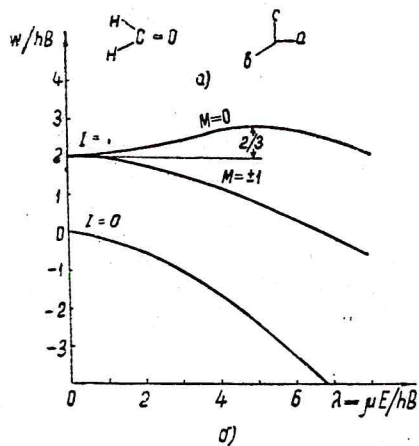


Рис. 1: а) молекула формальдегида, б) штарк-эффект линейной молекулы.

Использовался наинизший вращательный переход молекулы  $1_{01}-0_{00}$  с частотой  $\sim 72838$  мГц. Слабая асимметрия молекулы позволяет с хорошей точностью при рассмотрении штарк-эффекта этих уровней обращаться к эффекту Штарка для перехода  $J=1 \rightarrow 0$ ,  $K=0$  симметричного волчка. В свою очередь, штарк-эффект для уровней симметричного волчка с  $K=0$  идентичен штарк-эффекту линейной молекулы [3], который приведен на рис. 1б. Разумеется, в качестве вращательной постоянной  $B$  линейной молекулы следует пользоваться средним из вращательных постоянных  $B$  и  $C$  формальдегида. Из рис. 1б следует, что вид штарк-эффекта рассматриваемых уровней благоприятен для осуществления сортировки молекул верхнего и нижнего уровней, а именно: „активные“ молекулы верхнего уровня с  $M=0$  фокусируются обычными фокусирующими системами в резонатор, в то время как

молекулы нижнего уровня с  $M=\pm 1$  — нет.

„пассивные“ молекулы нижнего уровня дефокусируются. Молекулы верхнего уровня с  $M = \pm 1$  также дефокусируются.

Существует оптимальная для сортировки напряженность поля в сортирующей системе, соответствующая максимальной штарк-энергии активных молекул. Она равна примерно  $150 \text{ кв} \cdot \text{см}^{-1}$ , что соответствует примерно  $15 \text{ кв}$  на использовавшейся нами системе. Наличие точки  $\delta W/\delta E = 0$  позволит, по-видимому, резко уменьшить влияние изменений сортирующего напряжения на число активных молекул на выходе сортирующей системы, что должно благоприятно повлиять на стабильность частоты молекулярного генератора.

Угол захвата определялся, как обычно, из равенства энергии радиального движения молекулы и штарк-энергии. Максимальный угол захвата  $\alpha \approx 3^\circ$ . Следует отметить, что активные молекулы сортируются полем единообразно, так как отсутствует разброс по числам  $M$ . Матричный элемент дипольного момента определялся с помощью таблиц [4] с учетом того, что в нашем случае излучение линейно поляризовано. Оказалось, что  $|\mu_{ij}|^2 = 1,77 \text{ дебая}^2$ .

Населенность  $\delta$  уровня  $1_{01}$  с учетом того, что вращательная сумма  $Q_{\text{вр}} = 1440$  при  $T = 300^\circ\text{K}$ , ядерный вес уровня  $g = 1$ , средний ядерный вес  $g = 2$ , равна  $0,09\%$ , а в состоянии  $M = 0$  находится  $\delta_0 = 0,03\%$  молекул.

Весьма интересной особенностью рассматриваемого перехода является простота линии. Действительно, в молекуле  $\text{CH}_2\text{O}$  спины ядер С и О равны нулю, а спин ядра Н равен  $1/2$ , следовательно, отсутствует ядерная квадрупольная сверхтонкая структура [8]. Кроме того, рассматриваемый переход относится к состоянию, в котором суммарный спин ядер Н равен нулю, так что отсутствует и магнитная сверхтонкая структура линии. Указанное обстоятельство должно благоприятно повлиять на стабильность частоты молекулярного генератора на этой линии.

Представляет интерес оценка величины параметра возбуждения\*

$$\eta = \frac{4\pi N_a Q |\mu_{ij}|^2 \tau^2}{\hbar s l}, \quad (1)$$

где  $Q$ —добротность резонатора,  $N_a$ —число активных молекул, влетающих в резонатор в секунду,  $|\mu_{ij}|^2$ —квадрат матричного элемента дипольного момента перехода,  $\tau$ —время пролета молекулой резонатора,  $s, l$ —сечение и длина резонатора.

Если считать, что верхний предел для  $N_a$  определяется столкновениями молекул в пучке, то условие равенства длины свободного пробега молекулы  $\lambda$  и длины пучка  $L$  даст значение  $N_a$ . Для длины свободного пробега молекул в пучке, пронизывающем сортирующую систему и резонатор, следует взять выражение

$$\lambda = b/\sqrt{2} \sigma n,$$

где  $b$ —коэффициент, имеющий значение между 1 и 3 ( $b = 1$  соответствует длине свободного пробега в газе,  $b = 3$ —длине свободного пробега в однонаправленном пучке молекул [7]),  $n$ —плотность молекул,  $\sigma$ —площадь поперечного сечения молекулы. Величина  $\sigma$  получается из радиоспектроскопических измерений; она учитывает соударения, при которых может измениться квантовое состояние молекулы [8], а следовательно, нарушается сортировка молекул. Из равенства  $\lambda = L$ ,

\* Условие  $\eta \geq 1$  соответствует режиму генерации лазера [5, 6].



выражая плотность молекул  $n$  через поток  $N$  в виде  $n = N/s_1 v$ , где  $s_1$  — сечение сортирующей системы,  $v$  — средняя скорость молекул, получим:

$$N = b s_1 v / \sqrt{2} \sigma L.$$

Так как число захваченных сортирующей системой молекул того или иного уровня пропорционально квадрату соответствующего угла захвата, доля активных молекул на выходе сортирующей системы будет отличаться от доли в равновесном состоянии  $\delta_0$  на множитель  $2\alpha_3^2/\alpha_3^2 \sim 1,9$ , где черта означает усреднение по различным квантовым состояниям, а коэффициент 2 появляется из-за того, что половина молекул, попадающих в угол захвата, дефокусируется.

При вычислении  $\alpha_3^2$  принимался во внимание лишь штарк-эффект уровней  $K$ -удвоения, так как другие переходы  $P$  и  $R$  ветвей имеют значительно более высокую частоту. Следовательно,

$$N_a = \frac{b s_1 v}{\sqrt{2} \sigma L} 2\delta_0 \frac{\alpha_3^2}{\alpha_3^2}. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1) и взяв  $b = 2$ ,  $s_1 = 0,03 \text{ см}^2$ ,  $v = 5 \cdot 10^4 \text{ см} \cdot \text{сек}^{-1}$ ,  $\sigma = 3 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$ ,  $L = 7,5 \text{ см}$ ,  $Q = 3500$ ,  $\tau = 6 \cdot 10^{-5} \text{ сек}$ ,  $sl = 0,2 \text{ см}^3$ , получим  $\eta \approx 7$ .

Так как в приведенном расчете учитывалась только принципиальная трудность — соударения в пучке, то полученная оценка  $\eta$  является максимальной. Проведя аналогичные расчеты для генератора на линии  $J=3$ ,  $K=3$  аммиака, можно оценить отношение максимальных параметров возбуждения

$$\eta_{\text{NH}_3} / \eta_{\text{CH}_3\text{O}} \sim 15.$$

Блок-схема установки приведена на рис. 2. Пучковый мазер на формальдегиде имел ту же конструкцию, что и обычный аммиачный

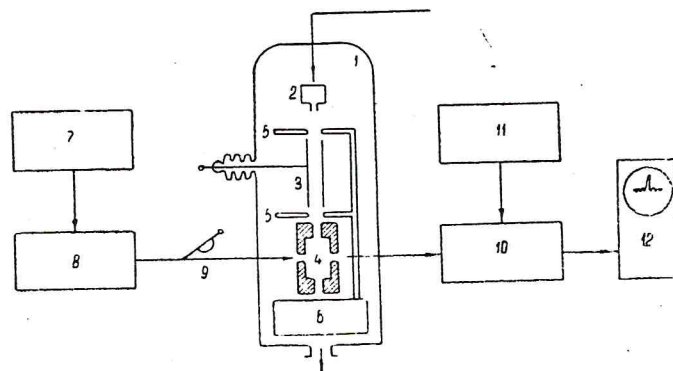


Рис. 2. Блок-схема установки:

1 — вакуумный кожух, 2 — источник пучка молекул, 3 — сортирующая система, 4 — проходной резонатор на моду  $E_{010}$ , 5 — холодные диафрагмы, 6 — дуар с жидким азотом, 7 — сигнальный клистрон 3-см диапазона, 8 — умножитель на 9, 9 — аттенуатор, 10 — супергетеродинный приемник, 11 — гетеродинный клистрон, 12 — осциллоскоп.

мазер. Разумеется, детали были уменьшены по величине. Использовался проходной резонатор на моду  $E_{010}$ . Диафрагма между источником и сортирующей системой могла убираться. При этом срок непрерывной генерации лазера увеличивался до нескольких часов.

В качестве сигнала использовалась девятая гармоника клистрона, стабилизированного по кварцу с помощью схемы ФАП. Частота кварца могла перестраиваться в небольших пределах, а также качаться с частотой сети для наблюдения спектральной линии на экране осциллографа. В качестве гетеродина использовалась вторая гармоника 8-мм клистрона, стабилизированного по объемному резонатору (использовался стандартный волномер). Эта же схема использовалась для снятия резонансной кривой резонатора мазера для определения его добротности.

Супергетеродинный приемник имел полосу УПЧ 3 мГц. Величина шум-фактора всего приемника могла контролироваться путем подключения к его входу газоразрядной шумовой трубки (на блок-схеме не указана). Эквивалентная температура трубки определялась ранее по радиометру с тепловой калибровкой. Трубка использовалась также в качестве источника эталонного излучения при измерении мощности молекулярного генератора. Мощность, поступающая на приемник от молекулярного генератора, равнялась  $2,6 \cdot 10^{-12}$  Вт. Коэффициент связи резонатора определялся обычным путем по величине коэффициента прохождения по мощности и был порядка 0,1. Таким образом, мощность в резонаторе соответствовала примерно  $3 \cdot 10^{-11}$  Вт.

На рис. 3 приведена зависимость амплитуды генерации от напряжения на сортирующей системе. Наличие плоского участка в пре-

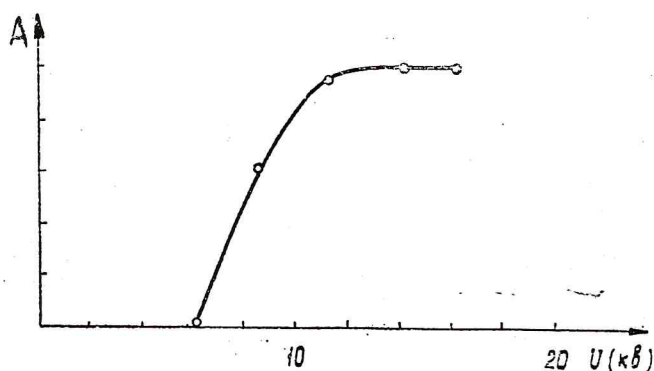


Рис. 3. Зависимость амплитуды генерации (в условных единицах) от напряжения на сортирующей системе.

делах  $13 \div 16$  кВ подтверждает сделанные выше выводы о виде шарк-эффекта.

Линия излучения наблюдалась на экране осциллографа как синглет при соотношении сигнал/шум  $\sim 25$ ; измеренная ширина ее была порядка 15 кГц, что согласуется с расчетом по времени пролета молекулой резонатора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Ф. Крупнов, В. А. Скворцов, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 5, 611 (1962).
2. А. Ф. Крупнов, В. А. Скворцов, Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 5, 820 (1962).
3. P. Thaddeus, J. Loubser, A. Javan, L. Krisher, H. Lecar, Quantum Electronics, New York, Columbia University Press, 1960, p. 47.
4. R. H. Schwendeman, V. W. Laurie, Tables of line strengths, Pergamon Press, 1957.

6. В. С. Троицкий, Радиотехника и электроника, 3, 1298 (1958).
6. Н. Г. Басов, Докторская диссертация, ФИАН, М., 1956.
7. В. С. Троицкий, ЖЭТФ, 41, 389 (1961).
8. Ч. Таунс, А. Шавлов, Радиоспектроскопия, ИЛ, М., 1959.

Научно-исследовательский радиофизический институт  
при Горьковском университете

Поступила в редакцию  
3 августа 1962 г.

# ON THE MOLECULAR GENERATOR IN 4 mm BAND WITH THE BEAM OF FORMALDEHYDE MOLECULES

A. F. Krupnov, V. A. Skvortzov

The design and some characteristics of beam maser at the frequency 72838 Mc/s on transition  $1_{01}-0_{00}$  of the molecule  $\text{CH}_2\text{O}$  are given. The lack of fine structure of the line as well as the peculiarities of the stark effect appear to be favourable for obtaining of the high frequency stability. The order of molecular generator power was proved to be equal to  $10^{-11}$  w.