

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

# ПРИБОРЫ и ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

## СТАБИЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТЫ МИКРОВОЛНОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В МИЛЛИМЕТРОВOM И СУБМИЛЛИМЕТРОВOM ДИАПАЗОНАХ

Ю. А. ДРЯГИН, А. Ф. КРУПНОВ, Л. М. КУКИН, В. А. СКВОРЦОВ

Осуществлена частотная автоподстройка с.в.ч. генераторов — ламп обратной волны (л.о.в.) — по резонатору Фабри — Перо и спектральным линиям поглощения газов в диапазоне  $4 \div 0,8$  мм.

В работе применена обычная схема автоподстройки частоты по резонансному элементу, на склоне резонансной кривой которого частотно-модулированный сигнал источника (л.о.в.) типов, описанных в [1], преобразовывался в амплитудно-модулированный сигнал. Блок-схема установки приведена на рис. 1. Для автоподстройки использовалась зависимость фазы продетектированного сигнала от знака расстройки генератора и резонансного элемента. В качестве резонансного элемента использовался либо обычный объемный резонатор, либо резонатор Фабри—Перо, либо контур спектральной линии поглощения в газе.

В [2] дан анализ качества работы системы автоподстройки в зависимости от ее параметров. В частности, рекомендуется максимально расширять полосу усилителя на частоту модуляции. Для получения достаточно широкой полосы выбрана частота модуляции  $\sim 1$  МГц; такой выбор облегчает также получение малого индекса модуляции, т. е. большей чистоты спектра стабилизированного сигнала.

Частотная модуляция л.о.в. осуществлялась подачей напряжения с частотой  $\sim 1$  МГц в цепь катода л.о.в. Так как катод л.о.в. находится под высоким потенциалом относительно земли, модулирующее напряжение подавалось на катод через трансформатор, выполненный на ферритовом кольце

с обмотками из нескольких витков. Амплитуда модуляции подбиралась так, чтобы индекс модуляции не превышал 0,1. Фаза модуляции могла регулироваться фазовращателем. Мощность, излучаемая л.о.в., делилась на 2 части: меньшая (до 30%) направлялась на резонансный элемент для осуществления автоподстройки, большая часть могла использоваться в качестве полезной мощности.

Отметим особенности выхода схемы. Частота колебаний л.о.в. зависит от напряжения, приложенного между ее катодом и замедляющей системой, причем в этой цепи про-

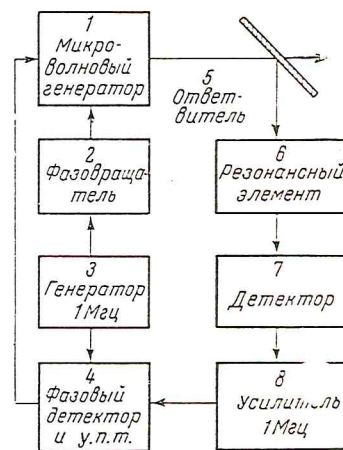


Рис. 1. Блок-схема установки

1 ÷ 4 кв. Поэтому в отличие, например, от управления частотой клистронов, которое осуществляется изменением напряжения на отражателе практически без затраты мощности, управление частотой л.о.в. требует использования достаточно мощного управляющего элемента. Кроме этого, удобно, чтобы схема стабилизации, связанная по постоянному току с л.о.в., не находилась под высоким потенциалом. Поэтому на выходе у.п.т. применен катодный повторитель.

В качестве опорного резонатора на волнах 2 мм и короче нами обычно использовался интерферометр Фабри — Перо. Сделаем несколько замечаний о способах возбуждения таких резонаторов. Связь резонаторов Фабри — Перо с с.в.ч. трактом обычно осуществляется через малое отверстие в зеркале, к которому примыкает волновод, либо плоской волной через один из отражателей, который в этом случае делается полупрозрачным. Нами успешно используется метод возбуждения резонаторов Фабри — Перо при помощи пленки связи, установленной между зеркалами и облучаемой плоской волной из рупора. Такой способ известен [3], однако он не получил еще широкого распространения. С нашей точки зрения, он обладает значительными преимуществами. Благодаря тому, что зеркала не имеют каких-либо неоднородностей, искажающих поле волны, легко достижимы достаточно высокие значения добротности — до  $5 \cdot 10^5$ . По этой же причине облегчается изготовление зеркал. При правильной юстировке пленки и зеркал в резонаторе возбуждается лишь один основной тип колебаний. Добротность резонатора регулируется в широких пределах изменением коэффициента связи путем подбора коэффициента отражения пленки, который зависит от диэлектрической постоянной материала пленки, ее толщины и, вблизи угла Брюстера, от поляризации падающей волны.

Опорный резонатор состоит из двух вогнутых сферических зеркал  $\phi$  50 мм, покрытых напыленным под вакуумом слоем Ag толщиной 5 мк. Расстояние между ними  $\sim 100$  мм, радиус кривизны зеркал 0,7 м. Посредине между зеркалами под углом  $45^\circ$  к оси резонатора расположена лавсановая пленка толщиной 10 мк, натянутая на рамку. Зеркала и рамка снабжены юстировочными устройствами. Кроме того, одно из зеркал может передвигаться вдоль оси резонатора для пе-

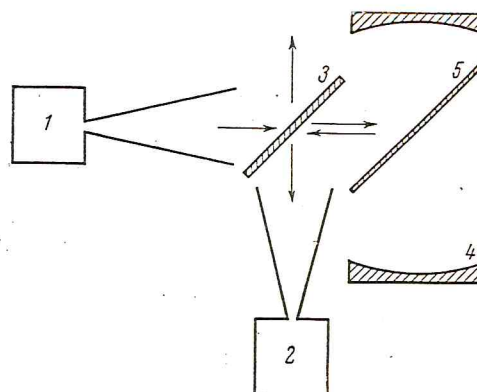


Рис. 2. Схема с.в.ч. тракта с резонатором Фабри—Перо. 1 — микроволновый генератор, 2 — детектор, 3 — делительная пластина, 4 — отражатели резонатора Фабри — Перо, 5 — пленка связи

рестройки его частоты. В целях повышения температурной стабильности корпус резонатора выполнен из инвара.

Схема всего с.в.ч. тракта показана на рис. 2. Излучение генератора формируется рупором в плоскую волну и поступает на делительную пластину. Большая часть мощности генератора отражается и образует полезный выходной сигнал, а меньшая часть ( $\sim 20\%$ ) проходит через делительную пластину, возбуждает опорный резонатор и — при резонансе — переизлучается обратно, причем основная часть этой отраженной волны попадает в приемный рупор и детектор системы а.п.ч. Делительная пластина сделана из слюды толщиной около 0,1 ÷ 0,2 мм. Размеры раскрытия рупоров  $23 \times 10$  мм<sup>2</sup>, длина рупоров 120 мм. На волне 4 мм с.в.ч. тракт системы а.п.ч. был выполнен на стандартных волноводных узлах, а в качестве резонатора использовался как интерферометр Фабри — Перо, так и обычный резонансный волномер.

В ряде случаев имеется необходимость стабилизации генератора на фиксированной частоте, причем зачастую желательно возможно точнее знать абсолютное значение стабилизированной частоты. В этих случаях весьма удобна автоподстройка частоты по резонансной кривой спектральной линии поглощения в газе, частота которой не зависит от внешних условий. Особое значение этот метод приобретает в субмиллиметровой области, где до сих пор не осуществлена кварцевая стабилизация частоты.



ства линий может быть рассчитано с точностью до  $10^{-5} \div 10^{-6}$  из вращательных и центробежных констант молекулы газа. Для большинства газов эти константы известны из более длинноволновых измерений [4]. Для использовавшихся газов добротность спектральных линий, определяющаяся эффектом Доплера, равна по порядку величины  $\nu/\Delta\nu_d \sim 10^6$ . Интенсивность спектральных линий в микроволновом диапазоне обычно растет с частотой как  $\nu^2 \div \nu^3$ . Поэтому в диапазоне коротких миллиметровых и субмиллиметровых длин волн имеется большое количество весьма интенсивных линий с коэффициентами поглощения  $\gamma \sim 10^{-2} \div 10^{-1} \text{ см}^{-1}$ . Интенсивность линий определяет выбор оптимальной длины наполненной газом ячейки поглощения [4]  $l_0 \sim 2/\gamma$ . Небольшие размеры ячейки для сильных линий делают систему стабилизации компактной, а также позволяют избежать трудностей, связанных с передачей субмиллиметрового излучения по длинному волноводу. Отметим, что газонаполненную ячейку несложно выполнить отпаянной.

Технически стабилизация частоты по спектральной линии мало отличается от стабилизации по резонатору. В качестве поглощающей ячейки использовался вакуумированный отрезок волновода сечением  $1,8 \times 3,6 \text{ мм}^2$  и длиной 15 см, который наполнялся тем или иным газом при давлениях  $\sim 10^{-1} \div 10^{-2} \text{ тор}$ . На ячейку отвечалось  $\sim 1/2$  мощности л. о. в., прошедший через ячейку сигнал детектировался и поступал либо на осциллоскоп для наблюдения линии, либо на схему а. п. ч. для стабилизации частоты л. о. в.

Наблюдением линии при разных уровнях мощности проверялось отсутствие насыщения. На этой ячейке наблюдался ряд линий  $\text{NH}_3$ ,  $\text{ND}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  в диапазоне  $0,49 \div 1,77 \text{ мм}$ . Наиболее сильные линии приведены в таблице. Схема стабилизации опробовалась на ряде линий  $\text{H}_2\text{CO}$ , соответствующих переходам  $J = 3 \rightarrow 4$ ,  $J = 4 \rightarrow 5$  и различным значениям  $K$  в диапазоне  $\lambda = 0,8 \div 1,07 \text{ мм}$ .

Отметим некоторые свойства системы а. п. ч., существенные для практического применения. Величина зоны удержания при стабилизации как по резонатору, так и по линии составляла  $\sim 100 \text{ в}$  на замедляющей системе. Это обеспечивало длительную (более получаса) бесподстроечную работу системы

Вещество	Переход	Длина волны, мм	
$\text{ND}_3$	$J = 1 \rightarrow 2$ $K = 0$	0,49	$\nu = 614\,917 \text{ Мгц}$ $\nu = 614\,938 \text{ Мгц}$ [4] $\nu = 618\,092 \text{ Мгц}$
	$K = 1$		
$\text{NH}_3$	$J = 0 \rightarrow 1$ $K = 0$	0,53	$\nu = 572\,944 \pm \pm 3 \text{ Мгц}$ [5]
$\text{H}_2\text{O}$	$1_{-1} \rightarrow 1_{+1}$	0,54	$\nu = 557,0 \text{ Ггц}$ [4]
$\text{H}_2\text{CO}$	$J = 7 \rightarrow 8$	0,5 $\div$ 0,54	Группы разрешенных линий с различными значениями $K$
	$J = 6 \rightarrow 7$	0,6	
	$J = 4 \rightarrow 5$	0,8 $\div$ 0,87	
	$J = 3 \rightarrow 4$	1 $\div$ 1,07	
$\text{H}_2\text{S}$	$2_0 - 2_2$	1,38	$\nu = 216\,710,46 \text{ Мгц}$
	$1_{-1} - 1_{+1}$	1,77	$\nu = 168\,762,87 \text{ Мгц}$ [6]

а. п. ч. Одна и та же радиосхема а. п. ч. применялась для стабилизации л. о. в. в диапазоне от 4 до 0,8 мм, которые имели различную крутизну зависимости частоты от напряжения ( $20 \div 50 \text{ Мгц/в}$ ). Таким образом, полоса удержания по частоте равнялась для различных ламп  $2 \div 5 \text{ Ггц}$ . В этих пределах частота л. о. в. следует за частотой резонатора при его перестройке. Оценка величины коэффициента стабилизации <sup>1</sup> дала величину  $\sim 500 \div 1000$ . Постоянная времени в цепи фазового детектора обеспечила полосу эффективной работы системы а. п. ч. порядка нескольких кгц. Отметим, что именно в диапазоне от нуля до нескольких кгц расположен спектр наиболее сильных дестабилизирующих факторов: нестабильности питания, сетевых наводок, микрофонного эффекта.

В пределах перестройки л. о. в. на субмиллиметровый диапазон находилось несколько спектральных линий  $\text{H}_2\text{CO}$ . Это давало возможность получить ряд фиксированных частот стабилизации, причем переход с линии на линию осуществлялся просто перестройкой л. о. в. в нужный участок диапазона. Так же осуществлялся и переход с одного

<sup>1</sup> Параметры системы а. п. ч. были обследованы методом, описанным в [7].

продольного типа колебаний резонатора на другой. При этом система входила в режим стабилизации без каких-либо дополнительных подстроек.

В заключение авторы выражают благодарность И. Л. Берштейну и Д. П. Степанову за полезные советы при проектировании установки в целом, а также Б. В. Громову, Е. К. Олонову, О. Л. Рыбушкину и Л. А. Синегубко, принимавшим участие в создании экспериментальных установок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. Б. Голант, Р. Л. Виленская, Б. А. Зюлина, З. Ф. Каплун, А. А. Негирев, В. А. Париков, Т. Б. Ребров

*Примечание при корректуре:* Дальнейшим развитием системы стабилизации по спектральным линиям может явиться стабилизация по узкому провалу насыщения в доплеровской линии, аналогично стабилизации лазеров по провалу Лэмба. Такой провал наблюдался нами, например, на линии воды в резонаторе Фабри—Перо.

- ва, В. С. Савельев, ПТЭ, 1965, № 4, 136.
2. И. Л. Берштейн, Изв. Вузов, Радиофизика, 1964, 7, 328.
3. G. Schulten, Frequenz, 1966, 20, 10.
4. Ч. Таунс, А. Шавлов, Радиоспектроскопия, 1959, Изд-во иностр. лит.
5. А. Ф. Крупнов, В. А. Скворцов, Л. А. Синегубко, Изв. Вузов, Радиофизика, 1968, 11, 1186.
6. J. J. Gallagher, R. E. Cunn, Rev. Scient. Instrum., 1963, 34, № 8, 843.
7. Д. П. Степанов, Изв. Вузов. Радиофизика, 1968, 11, 514.

*Научно-исследовательский радиофизический институт при Горьковском госуниверситете.  
Получено 23/XI—67 г.*