

ющей материи систематически различаются на различных галактических долготах l (что хотя и известно, но не обсуждалось в рассматриваемом аспекте). Общее более сильное поглощение, большая резкость и контрастность темных и светлых участков, указывающая на расположение пылевой материи в основном перед светящимся веществом, характерны для l от $\sim 20^\circ$ до $\sim 105^\circ$.

Значит, примерно здесь наблюдается вогнутый край спиральной ветви. В интервале l от $\sim 245^\circ$ до $\sim 340^\circ$ обнаруживается выгнутая кромка другой ветви. Этот результат согласуется с определениями общего хода спиральных ветвей Галактики в широкой окрестности Солнца прямыми наблюдательными методами и также дает отстающие ветви.

Итак, применение к Галактике описанного метода определения направления вращения спиралей в наблюдаемых с ребра галактиках подтверждает как отстающий характер вращения спиралей Галактики, так и действенность метода (и достаточную регулярность спиральной структуры Галактики в довольно широкой окрестности Солнца, что совсем не тривиально).

Подтверждение действенности метода даже в столь необычных условиях применения позволяет оптимистически расценить перспективы его использования для определения направления вращения спиралей в многочисленных более далеких наблюдаемых с ребра спиральных галактиках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Цицин Ф. А. — Астрон. цирк., 1955, № 157, с. 10. [2] Паша И. И., Цицин Ф. А. — Письма в Астрон. журн., 1979, 5, № 12, с. 627. [3] Curtis H. D. — Publ. Lick Obs., 1918, 13. [4] Lindblad B. — Stockholm Obs. Medd., 1934, N 14. [5] Slipher V. M. — Publ. Amer. Astron. Soc., 1920, 4, p. 232. [6] Hubble E. P. — Astrophys. J., 1943, 97, p. 112. [7] Irwin J. B. — Astron. J., 1952, 57, p. 15. [8] Vaucoeurs G., de. — Astrophys. J., 1958, 127, p. 487. [9] Danver C. G. — Lund Obs. Medd. 1, 1940, N 157. [10] Lindblad B., Brahe R. — Astrophys. J., 1946, 104, p. 211. [11] Уитни Ч. Открытие нашей Галактики. М.: Мир, 1975. [12] Бок Б., Бок П. Млечный Путь. М.: Мир, 1978.

Поступила в редакцию
05.02.81

УДК 621.072

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОСТАБИЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА, СТАБИЛИЗИРОВАННОГО СВЕРХПРОВОДЯЩИМ РЕЗОНАТОРОМ НА САПФИРЕ

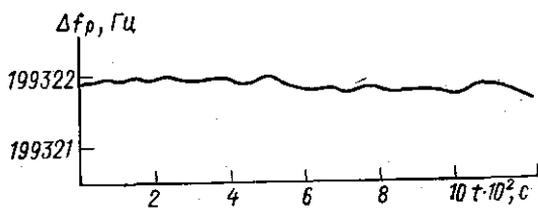
Н. И. Балалыкин, В. И. Назаров, В. И. Панов

(кафедра физики колебаний)

В настоящей работе приведены результаты исследования трехрезонаторного СВЧ-генератора, стабилизированного сверхпроводящим резонатором (СПР) на сапфировой основе [1]. Интерес к таким источникам частоты определяется их высокой стабильностью и спектральной чистотой сигнала наряду с простотой исполнения и компактностью.

Исследуемый генератор был целиком изготовлен из монокристалла сапфира и состоял из трех последовательно связанных резонаторов. Первый резонатор вместе с включенным в него туннельным диодом

ЗИ202Б представлял собой стабилизируемый генератор; второй с добротностью $Q_2 \approx 100$ связывал генератор со стабилизирующим резонатором. В качестве стабилизирующего резонатора использовался сверхпроводящий резонатор TM_{010} с резонансной частотой $f \approx 2,9$ ГГц и геометрическим фактором $\Gamma = 70$ Ом, покрытый сверхпроводящей пленкой Nb и имеющий при температуре $T = 1,7$ К добротность $Q \approx 2 \cdot 10^8$. Первый и второй резонаторы покрывались проводящей пленкой серебра; связь между ними осуществлялась с помощью окна связи в сопредельной стенке резонаторов и составляла $k_1 \approx 1,5 \cdot 10^{-1}$. Связь $k_2 \approx 1 \cdot 10^{-4}$ между промежуточным и сверхпроводящим резонаторами была реализована при помощи запредельного волновода связи. Вывод СВЧ-мощности производился из резонатора генератора при помощи петли связи. При исследовании режимов работы и измерении параметров выходного сигнала система была размещена в криостате при температуре жидкого гелия. Откачка паров гелия в криостате позволяла понижать температуру до $T = 1,7$ К. Нестабильность температуры резонатора в процессе работы измерялась полупроводниковым датчиком КГГ и составляла $5 \cdot 10^{-3}$ К.



Режим затягивания частоты генерации стабилизирующим резонатором осуществлялся при заданной связи k_2 подбором связи k_1 и подстройкой частоты промежуточного резонатора. Коэффициент стабилизации экспериментально определялся как отношение величины перестройки частоты автономного генератора к величине перестройки частоты стабилизованного генератора. Перестройка частоты стабилизируемого генератора производилась изменением напряжения питания туннельного диода. Максимальная величина коэффициента стабилизации в такой схеме достигалась на стабильной ветви частотной кривой системы и лежала в пределах $5 \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^6$ в зависимости от участка частотной ветви. При этом полоса удержания составляла 50—100 МГц.

Нестабильность частоты исследовалась путем сравнения частот двух идентичных сапфировых генераторов. Для этого сигналы с генераторов подавались через однонаправленные элементы на балансный смеситель. Развязка между генераторами составляла 60 дБ. Исследуемые генераторы имели выходную мощность $W \approx 100$ мкВт. С выхода смесителя сигнал разностной частоты $\Delta f_p \approx 200$ кГц поступал на усилитель с полосой пропускания 10 кГц, а затем на делитель частоты с коэффициентом деления $K = 100$. Сигнал с частотой 2 кГц подавался на электронный счетчик периодов частотомера ЧЗ-38. Отношение сигнал/шум на выходе частотомера составляло ~ 60 дБ. Подобная система позволяла измерять относительные уходы частоты на уровне $1 \cdot 10^{-12}$ при временах усреднения $\tau > 1$ с.

Измерения стабильности частоты исследуемых генераторов производились в точке максимального коэффициента стабилизации на стабильной ветви частотной кривой. На рисунке приведена запись вариации разностной частоты Δf_p генераторов. Результаты представлены в виде вариации Аллена $\sigma_y^2(\tau)$. Получены следующие значения нестабильности частоты: $\sigma_y \approx 3,4 \cdot 10^{-12}$ за 10 с, $\sigma_y \approx 1,3 \cdot 10^{-11}$ за 100 с, относительный дрейф $\Delta f/f \approx 2 \cdot 10^{-10}$ за 1 ч.

Достигнутый уровень стабильности частоты в описанных генераторах не является предельным и определяется влиянием дестабилизирующих факторов. При низких температурах основными дестабилизирующими факторами являются флуктуации напряжения питания туннельного диода и вариация частоты стабилизирующего СПР. Температурные вариации частоты СПР возникают вследствие изменения линейных размеров резонатора, а также из-за флуктуаций мнимой части поверхностного импеданса сверхпроводника. Величину этих уходов удобно описывать зависимостью $\frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial T}$, называемой температурным коэффициентом частоты (ТКЧ). Для СПР с диэлектрическим заполнением ТКЧ записывается в виде

$$\frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial T} = - \frac{2\omega\mu_0}{3\Gamma} \delta(0) \frac{T_k}{T^2} \exp\left\{-\frac{1,82T_k}{T}\right\} - \left(1 + \frac{k_e}{2}\right) \alpha(T),$$

где ω — собственная частота СПР, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м, $\delta(0)$ — глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник, T_k — температура перехода в сверхпроводящее состояние, T — рабочая температура СПР, Γ — геометрический фактор СПР, k_e — коэффициент, характеризующий изменение диэлектрической проницаемости диэлектрика от температуры, $\alpha(T)$ — коэффициент линейного расширения диэлектрика.

Например, для сапфирового резонатора с $\Gamma = 70$ Ом, покрытого пленкой ниобия при температуре $T = 1,7$ К на частоте $\omega \approx 2 \cdot 10^{10}$ рад/с, величина $\frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial T} \approx 2 \cdot 10^{-9}$ К⁻¹. Следует отметить, что ТКЧ при $T <$

T_k в основном определяется изменениями реактивной составляющей поверхностного импеданса, так как вариации линейных размеров сапфирового СПР малы ($\alpha(T) \approx 3 \cdot 10^{-12}$ при $T = 2$ К [2]).

Изменения частоты туннельного генератора связаны с уходами напряжения питания. Зависимость частоты стабилизированного генератора от напряжения на рабочем участке $\frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial U} \approx 1 \cdot 10^{-7}$ 1/В; это означает, что для достижения относительной нестабильности частоты на уровне $1 \cdot 10^{-13}$ необходимо поддерживать напряжение с точностью $\sim 1 \cdot 10^{-6}$ В.

Сопоставляя приведенные выше оценки и результаты эксперимента, можно заключить, что кратковременная нестабильность частоты ограничивалась нестабильностью температуры СПР, а долговременный дрейф определялся в основном дрейфом напряжения питания туннельного генератора.

В заключение авторы выражают искреннюю благодарность В. Б. Брагинскому и И. И. Минаковой за ценные консультации и внимание к работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Минакова И. И., Назаров В. И., Панов В. И., Попельнюк В. Д. Стабилизация частоты твердотельного генератора сверхпроводящим резонатором на сапфире.— Письма в ЖТФ, 1978, 4, с. 172—176. [2] Брагинский В. Б., Васильев С. И., Панов В. И. Исследование теплового расширения монокристаллической окиси алюминия при низких температурах.— Письма в ЖТФ, 1980, 6, № 11, с. 655.