

ВЫСОКОДОБРОТНЫЙ РЕЗОНАТОР ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ СВЧ ГЕНЕРАТОРА

С.Н. Артеменко, В.Л. Каминский, Г.М. Самойленко, Б.Г. Журкин, А.Л. Карузский,
А.М. Цховребов

Описана простая методика обработки поверхности ниобия, позволяющая надежно получать объемные сверхпроводящие резонаторы с добротностью $Q_0 > 10^8$ при $T < 3$ К.

При создании эталонов времени /1/, чувствительных супергетеродинных приемников /2, 3/, при измерениях доплеровского сдвига и др. требуются генераторы с низким уровнем частотных шумов. Частотный шум δf вызывается сбоем фазы $\delta\varphi$ колебаний генератора A_T шумовым сигналом $A_{ш}$: $\delta\varphi = A_{ш}/A_T = \tau\delta f$.

Выражая флуктуацию частоты через отношение спектральной плотности шума $4kT$ к мощности генератора и заменяя τ через Q/f , получим /3-5/:

$$\delta f/\sqrt{1\Gamma_{ц}} = f/Q\sqrt{4kT/P_T}.$$

Видно, что снижение частотного шума достигается увеличением добротности резонансной системы. Если система состоит из двух связанных контуров с близкими собственными частотами, возможно явление затяжки, когда частота и шумовые свойства генератора определяются более высокодобротным резонатором. При значительной расстройке контуров происходит срыв затяжки /5/. Частота генератора ведет себя как гистерезисная функция частоты низкодобротного контура. Затягивая генератор на внешний высокодобротный резонатор, можно значительно снизить его частотный шум /6-8/.

С целью создания малозумящих генераторов в диапазоне частот 9 ГГц был изготовлен сверхпроводящий резонатор с $Q_0 \approx 3 \cdot 10^8$. Собственная добротность объемного резонатора /9/

$$Q_0 = \int_V H^2 dV / (\delta \int_S H_t^2 dS)$$

зависит от геометрии резонатора и моды колебаний, а также глубины скинслоя δ . В случае сверхпроводящих стенок потери вызываются взаимодействием СВЧ поля, проникающего на глубину /9/

$$\delta_{СП} = (\sqrt{3}/2\pi) (4m_0 \hbar v_F / 3\mu_0 e^2 n_0 \Delta)^{1/3} \text{Re}F^{-1/3}(\omega)$$

в слой с нормальными носителями. Сопоставление глубины скинслоя и $\delta_{СП}$ показывает, что переход в сверхпроводящее состояние дает увеличение добротности на 3 ÷ 5 порядков.

Исходная заготовка ниобия выбиралась по параметру

$$\gamma = \rho(T = 300 \text{ К}) / \rho(T = 4,2 \text{ К}),$$

характеризующему кинетические свойства нормальных носителей (сверхпроводимость при $T = 4,2$ К разрушалась магнитным полем). Наибольшее значение γ у имевшегося материала составляло 65.

При изготовлении деталей резонатора (крышка, дно с отверстиями связи, цилиндр диаметром 41 мм, высотой 43 мм) особое внимание уделялось обработке внутренней поверхности и параллельности торцов (для ослабления связи моды H_{011} с низкодобротными модами). Обработка осуществлялась по методике, описанной в /10, 11/. На токарном станке при скорости вращения 600 об/мин, глубине резания 30 мкм, подаче 30 мкм/оборот, 30-ю проходами производилась чистовая механическая обработка (деталь при обточке торцов из патрона не вынималась). После чистки в азотной кислоте становилась видимой зернистость ниобия. Далее детали подвергались электрополировке: в смеси серной и плавиковой кислот снимал-

ся слой толщиной 20 мкм. Вакуумноплотно детали собирались при тщательном соблюдении параллельности торцов (прокладки индиевые). В ходе измерений в полости резонатора постоянно поддерживался вакуум 10^{-7} торр. Измерения добротности проводились на установке, содержащей генератор — отражательный клистрон, фазосинхронизованный на умножитель кварцовой частоты (блок ЯЗ4-41, частотомера ЧЗ-38); разностная частота его и клистрона анализировалась фазовым детектором, куда подавался сигнал синтезатора частот Ч6-31, синхронизируемого рубидиевым стандартом Ч1-50.

Перестройка частоты синтезатором с точностью 1 Гц позволяла измерять амплитудно-частотные характеристики вплоть до $Q_0 \approx 10^{10}$, этот же генератор использовался в импульсных измерениях декремента затухания. Достигнутые значения добротности составляли

$$Q_0 = 3,5 \cdot 10^7 \quad (2,5 \cdot 10^7) \text{ при } T = 4,2 \text{ К,}$$
$$Q_0 = 3,0 \cdot 10^8 \quad (1,0 \cdot 10^8) \text{ при } T = 1,8 \text{ К}$$

с откачкой паров гелия (в скобках приведены значения Q_0 , полученные без электрополировки).

Таким образом показано, что использованная методика /10/, несмотря на свою простоту, позволяет надежно получать объемные сверхпроводящие СВЧ резонаторы с $Q_0 > 10^8$. При этом значения $Q_0 \approx 10^8$ достигаются непосредственно после механической обработки.

Авторы благодарны А.Н. Диденко за внимание к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Superconductor Applications: SQUIDS and Machines. Ed. by Brian B. Schwartz and D. Foner, Plenum Press, New York, 1977.
2. Lee G. S. Appl. Phys. Lett., 41, № 3 291 (1982).
3. Робинсон Ф. Шумы и флуктуации в электронных схемах и цепях. М., Атомиздат, 1980.
4. Капчинский И.М. Методы теории колебаний в радиотехнике. М., Госэнергоиздат, 1954.
5. Журкин Б.Г. и др. Препринт ФИАН № 65, М., 1986.
6. Braginsky V.B., Panov V.I., Vasiliev S.I. IEEE Trans. Magn., MAG-17, 955 (1981).
7. Панов В.И. ПТЭ, № 5, 124 (1980).
8. Голиус А.Б. и др. Препринт ФИАН № 19, М., 1974.
9. Диденко А.Н. Сверхпроводящие волноводы и резонаторы. М., Советское радио, 1973.
10. Диденко А.Н. и др. Письма в ЖТФ, 9, в. 22, 1368 (1983).
11. Труды НИИЯФ при Томском политехническом институте, под ред. Диденко А.Н., М., Атомиздат, вып. 5, 1975; вып. 9, 1979.

Поступила в редакцию 12 июня 1986 г.