

05.4;09

©1993

ГЕНЕРАТОР, СТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ СВЕРХПРОВОДЯЩИМ РЕЗОНАТОРОМ

Г.С.Гусев, А.Л.Калинин, Б.М.Лебедь, Л.Б.Розенбаум

Одним из наиболее реальных потенциальных применений высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) являются ВЧ-СВЧ устройства, использующие высокодобротные ВТСП резонаторы. К числу таких устройств относятся генераторы, стабилизированные ВТСП резонаторами, обладающие низким уровнем шумов выходного сигнала. Для частот $f \sim 1$ ГГц и выше уровень шумов (приблизительно обратнопропорциональный добротности Q стабилизирующего резонатора) может быть значительно ниже, чем у кварцевых генераторов, работающих с умножением частоты.

В [1] описан полуволновый полосковый ВТСП резонатор, имеющий ненагруженную добротность $Q \approx 2 \cdot 10^4$ на частоте 2.3 ГГц при температуре $T = 77$ К (жидкий азот), изготовленный на основе ВТСП пленки, судя по [2], талливой системы, а также генератор, стабилизированный этим резонатором. Шумы такого генератора на частоте, отстоящей на 10 кГц от основного сигнала, составили -100 дБ/Гц, или на 20 дБ/Гц меньше, чем шумы генератора, стабилизированного золотым резонатором аналогичной конструкции ($Q \approx 200$). В [3-9] описаны полосковые ВТСП резонаторы, использующие пленки системы YBaCuO, однако на частотах $f > 10^9$ Гц они уступают по добротности ВТСП резонатору, описанному в [1].

Добротность резонатора полоскового типа определяется соотношением

$$Q^{-1} = \frac{R_s}{G} + \beta \operatorname{tg} \delta + \gamma Q_{\text{э}}^{-1}, \quad (1)$$

где G — геометрический фактор резонатора, R_s — поверхностное сопротивление проводящего (ВТСП) материала, δ — угол потерь материала диэлектрической подложки, β — коэффициент ее включения, $Q_{\text{э}}$ — добротность экрана, в коротом находится резонатор для исключения потерь ВЧ

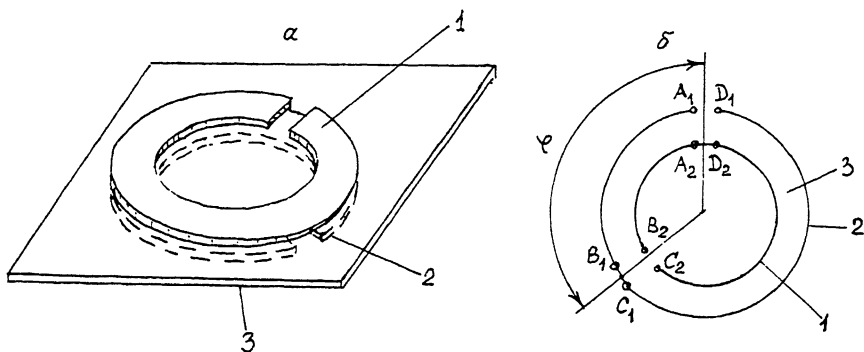


Рис. 1. Конструкция резонатора полоскового типа (а) и его электрическая схема.

энергии на излучение, γ — коэффициент связи ВТСП резонатора с экраном. В [1-9] использовались главным образом подложки из LaAlO_3 , обеспечивающие эпитаксиальный рост ВТСП пленок, имеющие при $T = 77$ К высокую относительную диэлектрическую проницаемость ($\epsilon_r = 24-26$), $\text{tg } \delta \approx 10^{-5}$ [1] и $\beta \approx 1$. Достигнутые для лучших образцов описанных ВТСП резонаторов добротности обеспечиваются главным образом низким значением R_s ВТСП пленок — на два порядка ниже, чем у нормально проводящих металлов при $T = 77$ К. Однако возможности дальнейшего значительного повышения добротностей ВТСП резонаторов на базе описанных в [1-9] технологий, а следовательно, и связанные с этим возможности снижения шумов генератора, ограничены величиной $Q_{|R_s \rightarrow 0} < \text{ctg } \delta \lesssim 10^5$.

В [10] нами описана конструкция резонатора полоскового типа. Он состоит из двух образцов 1 и 2 (рис. 1, а), изготовленных из проводящего (в частности, ВТСП) материала, приложенных друг к другу через изоляционную прокладку 3 или через зазор. Образцы 1 и 2 имеют форму радиально разрезанных (незамкнутых), в частности плоских, колец. Конструкция может быть рассмотрена как симметричная полосковая линия, разомкнутая на концах, свернутая в кольцо с последующим разворотом проводников на угол φ вокруг центра кольца (рис. 1, б). Соответственно электрическая схема резонатора может быть изображена в виде двух отрезков передающих линий $A_1 B_1 A_2 B_2$ и $C_1 D_1 C_2 D_2$, соединенных между собой в точках B_1, C_1 и A_2, D_2 . Рассматриваемая конструкция резонатора позволяет получить более

высокое значение G и меньшее значение β , чем в обычных полосковых резонаторах, и, в соответствии с (1), получить значительно более высокие добротности. Перестройка резонатора по частоте может производиться за счет изменения угла φ или расстояния между образцами 1 и 2.

Можно показать, что на частоте первого (основного) резонанса геометрические факторы G и \tilde{G} предлагаемого и обычного полуволнового симметричного полосковых резонаторов определяются соотношениями

$$G \approx \frac{43}{d} \sqrt{\frac{\psi r \Delta}{\epsilon_r}}, \quad (2)$$

$$\tilde{G} \approx \frac{60\pi^2}{\sqrt{\tilde{\epsilon}_r}} \frac{\tilde{\Delta}}{\tilde{l}} \frac{1}{1 + \tilde{\Delta}/\tilde{r}}, \quad (3)$$

где d — средний диаметр кольца, r — его радиальная ширина, $\psi = \psi(r/d)$ — табличная функция, приведенная, например, в [11], Δ — расстояние (зазор) между кольцами, ϵ_r — эффективная относительная диэлектрическая проницаемость этого зазора, \tilde{l} и \tilde{r} — длина и ширина каждого проводника обычного симметричного полуволнового полоскового резонатора, $\tilde{\Delta}$ — зазор между его проводниками, $\tilde{\epsilon}_r$ — эффективная относительная диэлектрическая проницаемость этого зазора, причем для одинаковых первых резонансных частот рассматриваемых резонаторов их размеры соотносятся в соответствии с формулой¹

$$\frac{\tilde{l}}{\pi} \sqrt{\tilde{\epsilon}_r} \approx \frac{d}{4} \sqrt{\frac{\psi r \epsilon_r}{2\Delta}}. \quad (4)$$

Описанный в [1] полосковый резонатор S -образной конфигурации имеет следующие характеристики: $\tilde{l} = 17.7$ мм, $\tilde{r} = 0.5$ мм, $\tilde{\Delta} = 0.5$ мм, $\tilde{\epsilon}_r = 24$, $\text{tg } \delta \approx 10^{-5}$, $\beta \approx 1$, размеры подложки 10×10 мм.

Принимая $r/d = 0.33$ ($\psi = 25$), $\Delta = \tilde{\Delta} = 0.5$ мм и $\epsilon_r = \tilde{\epsilon}_r = 24$, найдем из (4) $d = 3.9$ мм (т.е. в 1.5 раза меньше, чем \tilde{l}/π), а из (2) и (3) $G \approx 8.7$ Ом, $\tilde{G} \approx 1.7$ Ом, т.е. выигрыш в

¹ Обоснование соотношений (2)–(4) будет представлено в отдельной работе. Проверка (2)–(4) на специально изготовленных полосковых резонаторах из меди подтвердила справедливость этих соотношений.

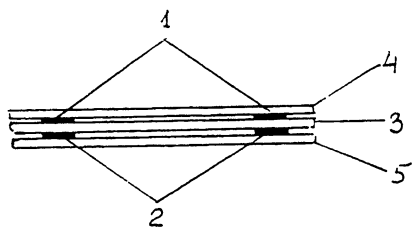


Рис. 2. Условное изображение поперечного сечения резонатора.

геометрическом факторе составляет 5.1 раза, а в габаритах 1.5 раза.

Выигрыш в геометрическом факторе может быть еще большим, если предлагаемый резонатор выполнить в виде, показанном на рис. 2. В этом случае пленочные проводники 1 и 2 должны быть нанесены на подложки 4 и 5 из LaAlO_3 , а зазор между проводниками 1 и 2 должен быть заполнен диэлектриком 3 с эффективной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r < \bar{\epsilon}_r$. Если этот зазор будет газовым ($\epsilon_r \approx 1$), то при $r/d = 0.33$, $\Delta = 0.5$ мм получим из (4) $d = 11.3$ мм, а из (2) $G \approx 24$ Ом, т.е. выигрыш в геометрическом факторе составит 15 раз при проигрыше в габаритах в 2 раза. При $\epsilon_r = 7.7$ получаются одинаковые габариты ($d = l/\pi$) и выигрыш в геометрическом факторе в 7 раз.

Выигрыш в геометрическом факторе в предлагаемом резонаторе объясняется тем, что распределение тока в проводниках линий $A_1 B_1 A_2 B_2$ и $C_1 D_1 C_2 D_2$ этого резонатора имеет иной, нежели в обычном полосковом резонаторе, вид. Оно показано на рис. 3 сплошными линиями. В утрированном виде это распределение имеет ступенчатый характер (пунктирные линии на рис. 3). При таком распределении токов, во-первых, уменьшается "эффект близости" проводников, а во-вторых, магнитные поля этих токов в меньшей степени, чем в обычном полосковом резонаторе, компенсируют друг друга.

Экспериментальная оценка влияния экрана, изготовленного из меди, выполненная в [12], показывает, что для замкнутого экрана при $T = 77$ К γQ_o^{-1} может составлять величину $(2-3) \cdot 10^{-6}$. Для конструкции резонатора с газовым зазором и ВТСП пленками такого же качества, что и в [1], с той же рабочей частотой 2.3 ГГц, учитывая, что в предлагаемом резонаторе $\beta \ll 1$, а в резонаторе [1] $\beta \approx 1$, из соотношения (1) найдем, что предлагаемая конструкция обеспечит достижение добротности $Q \approx 2 \cdot 10^5$, т.е. в 10 раз

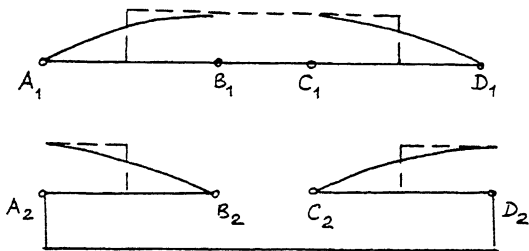


Рис. 3. Распределение тока в проводниках резонатора на первой частоте резонанса (сплошные линии) и его утрированное изображение (пунктирные линии) для $\varphi = 180^\circ$.

больше, чем у лучшего из известных резонаторов обычного полоскового типа.

На основе предлагаемых технических решений был изготовлен ВТСП резонатор с газовым зазором. В качестве ВТСП образцов использовались прессованные разрезанные кольца из керамики системы BiSrCaCuO [12]. Размеры колец: наружный диаметр — 30, внутренний — 18, толщина — 2 мм. При зазоре $\Delta \approx 1$ мм частота первого резонанса составила 1.17 ГГц. Наилучшие ВТСП образцы имели на этой частоте значение $R_s \approx 0.6$ мОм при $T = 77$ К, т.е. в 5 раз меньше, чем у меди при той же температуре. Несмотря на то, что прессованные керамические ВТСП материалы по величине R_s значительно уступают ВТСП эпитаксиальным пленкам, за счет выигрыша в геометрическом факторе резонатор имел добротность $Q \approx 3 \cdot 10^4$. Это является наибольшей из опубликованных добротностей для диапазона частот $f \geq 1$ ГГц при $T = 77$ К.

Изготовленный резонатор был применен для стабилизации частоты генератора. Активным элементом генератора служил кремниевый транзистор типа 2Т372. Частота генерации $f_0 \approx 1.17$ ГГц определялась резонансной частотой цепи, включенной между базой транзистора и корпусом генератора. Такой цепью являлся отрезок медной полосковой линии, индуктивно связанный с резонатором. Активный элемент и резонатор размещались в едином герметичном экранирующем корпусе цилиндрической формы. Выходной сигнал генератора через конструктивную емкость подавался в коаксиальный кабель, соединенный с измерительной схемой. Относительно полосковой линии резонатор можно было вращать или перемещать вдоль оси корпуса (экрана) и тем самым регулировать выходную мощность и степень стабилизации частоты генератора. При использовании ВТСП резонатора упомянутый корпус погружался в жидкий азот. Герметичность корпуса исключала флуктуации частоты из-за пузырькового кипения жидкого азота.

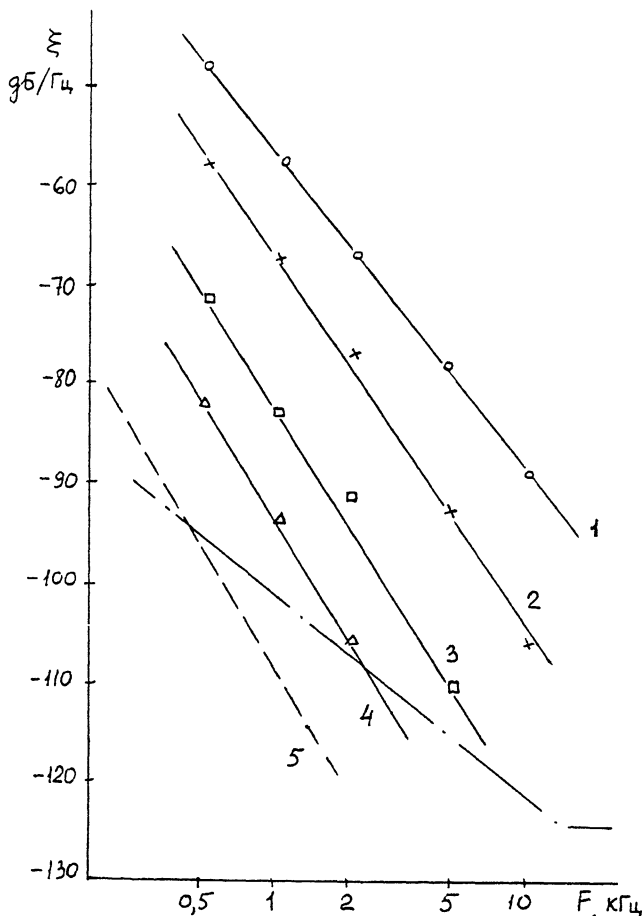


Рис. 4. Зависимости отношения мощности шума к мощности сигнала от частотных отстроек для генератора, стабилизированного резонаторами с различными добротностями: 1 — $T = 300$ К, $Q = 200$; 2 — $T = 300$ К, $Q = 10^3$; 3 — $T = 77$ К, $Q = 10^4$; 4 — $T = 77$ К, $Q = 3 \cdot 10^4$; 5 — ожидаемый результат при $Q = 2 \cdot 10^5$, $T = 77$ К. Пунктирная линия соответствует предельной чувствительности измерительной установки.

Измерение шумов генератора производилось методом частотного детектирования. Для этого выходной сигнал генератора через вентиль подавался на склон амплитудно-частотной характеристики специально изготовленного измерительного многомодового объемного резонатора (его объем $V \approx 25$ дм³) с нагруженной добротностью $Q_{\text{нр}}^{\text{нр}} \approx 10^4$.

Далее сигнал детектировался амплитудным детектором и усиливался. Спектральные составляющие шумов на выходе усилителя измерялись анализатором спектра С4-34 в полосе $\Delta F = 30$ Гц при частотных отстройках F от основного сигнала, составляющих 0,5, 1, 2, 5, 10 кГц. Отношение шум/сигнал вычислялось по формуле

$$\xi = 20 \lg \left(\frac{f_0}{Q_{\text{н}}^{\text{нр}}} \frac{U_{\text{ш}}}{U_{\text{д}}} \frac{1}{F \sqrt{\Delta F}} \right),$$

где $U_{\text{д}} \approx 0.15$ В — напряжение на выходе амплитудного детектора, $U_{\text{ш}}$ — амплитуда напряжения шумов, пересчитанная ко входу усилителя.

Были проведены измерения уровня шумов (рис. 4) генератора, стабилизированного несколькими типами резонаторов: при комнатной температуре — полуволновым полосковым резонатором обычной конструкции с добротностью $2 \cdot 10^2$ и медным резонатором предложенной конструкции с добротностью 10^3 ; при температуре кипения жидкого азота — ВТСП резонаторами с добротностями 10^4 и $3 \cdot 10^4$. Выходная мощность генератора, нагруженного на активное сопротивление 50 Ом, составляла 4 мВт.

Сравнивая полученные результаты с [1], можно отметить, что при одинаковых относительных частотных отстройках F/f_0 достигнутый нами уровень шумов генератора, стабилизированного ВТСП резонатором с добротностью $3 \cdot 10^4$, на 20 дБ/Гц ниже, чем в [1]. Это объясняется более низкой рабочей температурой активного элемента генератора (77 вместо 300 К) и более высокой добротностью стабилизирующего резонатора.

Еще более низкий уровень шумов можно было бы получить в генераторе с ВТСП резонатором на основе конструкции, показанной на рис. 2, имеющей газовый зазор между проводниками. Как указывалось выше, для ВТСП пленок, имеющих R_s , близкое к достигнутому в [1], эта конструкция обеспечила бы $Q \approx 2 \cdot 10^5$ и шумы генератора оказались бы еще на 15 дБ/Гц ниже (*пунктирная линия* на рис. 4).

Список литературы

- [1] Khanna A.P.S. et al. // Microwave J. 1991. Feb. P. 127.
- [2] // Superconductor Weak. 1990. V. 4. N 20. P. 1.
- [3] Takemoto J.H. et al. // IEEE Trans. on Magn. 1991. V. 27. N 2. P. 2549.
- [4] Talisa S.H. et al. // IEEE Trans. on Magn. 1991. V. 27. N 2. P. 2544.
- [5] Rensch D.B. et al. // IEEE Trans. on Magn. 1991. V. 27. N 2. P. 2533.
- [6] Lyons W.G. et al. // IEEE Trans. on Magn. 1991. V. 27. N 2. P. 2537.
- [7] Newman H.S. et al. // IEEE Trans. on Magn. 1991. V. 27. N 2. P. 2540.
- [8] Kalokitis D. et al. // J. of Electron. Mater. 1990. V. 19. N 1. P. 117.

- [9] *Belohoubek E. et al.* // J. of Superconduct. 1992. V. 5. N 4. P. 423.
- [10] *Розенбаум Л.Б. и др.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 15 (в печати).
- [11] *Калантаров П.А., Цейтлин Л.А.* Расчет индуктивностей. Л.: Энергия, 1970. С. 225.
- [12] *Гусев Г.С. и др.* // СФХТ. 1992. Т. 5. В. 3. С. 545.

Российский институт
мощного радиостроения
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
23 августа 1993 г.
