

13

Макет СВЧ-генератора с ВТСП дисковым резонатором в цепи обратной связи с низким уровнем фазового шума

© А.Е. Парафин, Д.В. Мастеров, С.А. Павлов, М.А. Кревский,
Г.М. Коробков, И.М. Кревский

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород
Научно-производственное предприятие „Салют“, Нижний Новгород
ОАО „Мобильные ТелеСистемы“, Москва
E-mail: parafin@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 13 мая 2013 г.

Представлены первые результаты измерения фазовых шумов макета СВЧ-генератора с дисковым резонатором на основе пленок высокотемпературного сверхпроводника $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ в цепи обратной связи. Дисковый резонатор охлаждался до температуры 77 К, остальные элементы схемы генератора находились при комнатной температуре. Несущая частота генератора 7.5 GHz. Проведены измерения уровня фазового шума в зависимости от величины отстройки от несущей. При отстройке от несущей на 10 kHz минимальный измеренный уровень фазового шума составил 136.2 dB/Hz. Показано, что полученные результаты соответствуют классической формуле Лисона без учета фликер-шума. Таким образом, дисковый резонатор на основе пленок $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ не вносит дополнительных по сравнению с шумами усилителя шумов при малых отстройках и, следовательно, может рассматриваться как перспективное устройство при создании СВЧ-генераторов с предельно низким уровнем фазового шума. В работе обсуждается возможность дальнейшего снижения уровня фазового шума за счет повышения добротности ВТСП дискового резонатора и оптимизации конструкции его корпуса.

Источники СВЧ-колебаний с низкими фазовыми шумами являются одними из важнейших элементов систем радиолокации, радионавигации, телеметрии, систем связи, измерительной техники и других радиотехнических систем. В источниках сигнала с низкой плотностью мощности фазового шума применяются различные виды резонаторов [1,2]. В то же время об исследованиях возможности использования дискового

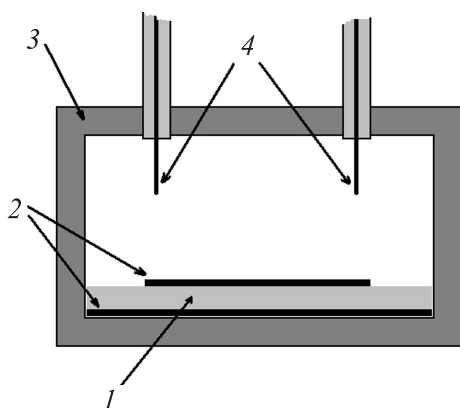


Рис. 1. Дисковый резонатор в корпусе: 1 — подложка; 2 — пленки YBCO; 3 — корпус; 4 — элементы связи.

резонатора на основе пленок высокотемпературного сверхпроводника для создания автогенераторов с низкими шумами нам неизвестно.

Исследуемый СВЧ-генератор состоит из усилителя, фазовращателя, направленного ответвителя и дискового резонатора в цепи обратной связи. Во время измерений резонатор охлаждался до температуры 77 К, остальные элементы схемы генератора находились при комнатной температуре.

Дисковый резонатор представляет собой подложку алюмината лантана размером 12.5×12.5 мм и толщиной 0.5 мм. На одной стороне подложки сформирован диск диаметром 9.7 мм из пленки высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO), вторая сторона подложки полностью покрыта пленкой YBCO. Технология напыления пленок и формирования на них рисунка описана в работе [3]. Диэлектрическая проницаемость алюмината лантана $\epsilon = 23.6$ [4]. В литературе приводятся различные значения тангенса диэлектрических потерь алюмината лантана: от $3 \cdot 10^{-5}$ [5] до менее чем 10^{-6} [4]. Дисковый резонатор помещался в квадратный корпус размером 12.5×12.5 мм и высотой 3.5 мм, связь с резонатором осуществлялась штыревыми антеннами (рис. 1). В качестве рабочей моды использовалась аксиально-симметричная мода TM_{010} . Расчет резонансной частоты моды с учетом

Таблица 1. Параметры резонаторов $R1$ и $R2$, измеренных при температуре 77 К

№	P_{in} , dBmW	f_0 , GHz	$Q_L \cdot 10^{-4}$	$Q_0 \cdot 10^{-4}$	Π , kHz	$S_{21 \max}$, dB
R1	-17	7.501798	1.71	3.02	219	-7.27
R1	+4	7.501797	1.71	3.01	220	-7.27
R1	+15	7.501830	1.68	2.85	223	-7.77
R2	-17	7.497028	2.67	4.20	140	-8.77
R2	+4	7.497025	2.67	4.20	140	-8.77

Примечание. P_{in} — мощность, подаваемая на вход резонатора; f_0 — резонансная частота; Q_L — нагруженная добротность резонатора; Q_0 — собственная добротность резонатора; Π — полуширина резонансной кривой; $S_{21 \max}$ — коэффициент передачи на резонансной частоте.

краевых эффектов [6] дает значение резонансной частоты 7.50 GHz, которое очень хорошо совпадает с измеренным значением.

Параметры исследуемых резонаторов $R1$ и $R2$ приведены в табл. I. Резонансная частота резонаторов f_0 определялась по максимуму резонансной кривой, нагруженная добротность определялась по формуле

$$Q_L = \frac{f_0}{2\Pi}, \quad (1)$$

где Π — полуширина резонансной кривой по уровню -3 dB от максимума. Собственная добротность резонатора, помещенного в корпус, при симметричной связи вычислялась как

$$Q_0 = \frac{Q_L}{1 - |S_{21}|}, \quad (2)$$

где $|S_{21}|$ — модуль коэффициента передачи на резонансной частоте по напряжению.

В соотношении (3) указаны источники потерь, определяющие величину нагруженной добротности Q_L резонатора, помещенного в корпус:

$$\frac{1}{Q_L} = \frac{R_{sur}}{\pi\mu_0 f_0 d} + \operatorname{tg} \delta + \frac{1}{Q_{pac}} + \frac{1}{Q_{rad}}. \quad (3)$$

Первое слагаемое определяется потерями в ВТСП-пленках [7]; второе слагаемое — диэлектрическими потерями в подложке; третье — потерями, связанными с корпусом резонатора, и определяется

его конструкцией и качеством изготовления. Четвертое слагаемое — потери на связь, определяется коэффициентом передачи S_{21} . Таким образом, собственную добротность резонатора, помещенного в корпус, приведенную в табл. 1, определяют первые три слагаемых правой части выражения (1).

Измерения амплитудно-частотных характеристик резонаторов проводились на векторном анализаторе цепей E8361A (производство Agilent Technologies), при этом максимальное значение падающей мощности составляло $P_{in} = +4$ dBmW. Резонатор R1 был также измерен на скалярном анализаторе цепей P2M-18 (производство НПО „Микран“), максимальное значение падающей мощности составило $P_{in} = +15$ dBmW. Результаты измерения параметров резонаторов при различных уровнях входной мощности представлены в табл. 1. Как видно из табл. 1, в рассмотренном диапазоне мощностей параметры резонаторов не изменяются, т.е. резонаторы работают в линейном режиме.

В качестве активного элемента в генераторе использовался двухкаскадный усилитель, собранный на микросхемах HMC606LC5 производства компании Hittite, дополненных полосовым фильтром для исключения самовозбуждения усилителя на других модах резонатора. В линейном режиме коэффициент усиления составлял около 22 dB. Для вывода сигнала генератора на анализатор спектра R&S FSUP 26.5 использовался направленный ответвитель -10 dB. Потери ответвителя на проход составляли 1.5 dB. Потери в фазовращателе не превышали 2 dB. Выходная мощность генератора с резонатором R1, измеренная на выходе направленного ответвителя, составила 5 dBmW. На вход усилителя подавалась мощность около 8 dBmW, при этом он работал в режиме глубокого насыщения и его коэффициент усиления снижался до значений примерно 12 dB. При построении генератора использовалась методика оптимизации генераторов СВЧ по фазовым шумам, изложенная в работах [8,9].

Для оценки фазовых шумов генераторов традиционно используется формула Лисона [10], имеющая следующий вид:

$$S_g(\Delta f) = \frac{GFkT}{2P} \left[\left(\frac{\Pi}{\Delta f} \right)^2 + 1 \right], \quad (4)$$

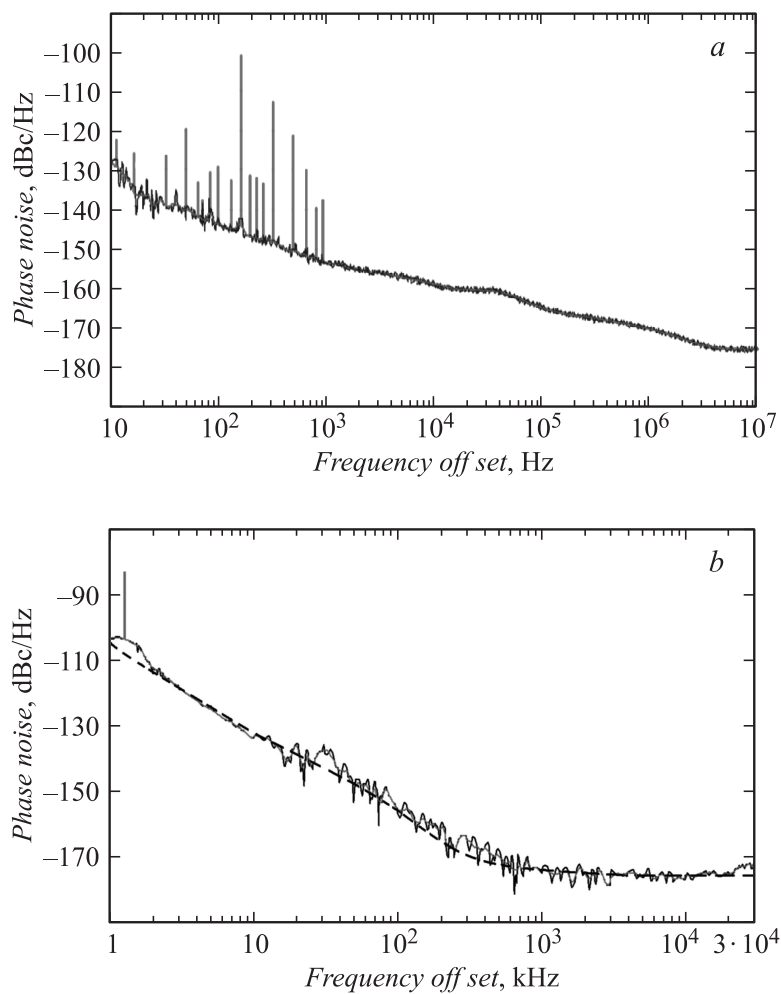


Рис. 2. Измерения зависимости спектральной плотности: *a* — вносимого фазового шума усилителя S_{ins} и *b* — фазового шума генератора S_g от величины отстройки от несущей; пунктирная линия — расчетные шумы генератора по формуле (5).

где G — коэффициент усиления активного прибора, F — коэффициент шума активного прибора, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, P — мощность, подводимая к резонатору, Π — полуширина полосы резонатора на уровне -3 dB, Δf — величина отстройки от несущей частоты генератора. В данной формуле не учитывается кубическая зависимость шумов от отстройки Δf , описывающая влияние фликер-шума и называемая в литературе обычно формулой Лисона–Катлера.

Если предположить, что коэффициент шума F описывает только шумы усилителя, то фактор $GFkT/2P$ в (4) имеет смысл шумов, вносимых усилителем. Тогда формула для оценки фазовых шумов генераторов может быть модифицирована следующим образом:

$$S_g(\Delta f) = S_{ins}(\Delta f) \left[\left(\frac{\Pi}{\Delta f} \right)^2 + 1 \right]. \quad (5)$$

Здесь $S_{ins}(\Delta f)$ — спектральная плотность мощности вносимых фазовых шумов усилителя. Важно, что при оценке фазовых шумов по данной формуле все параметры измеряются экспериментально. Это позволяет легко прогнозировать фазовые шумы генераторов по измеренным параметрам резонатора и усилителя.

Измерения зависимости спектральной плотности вносимого фазового шума используемого усилителя S_{ins} от величины отстройки от несущей (рис. 2, *a*) и спектральной плотности фазового шума генератора (рис. 2, *b*) проводились на анализаторе источников сигналов R&S FSUP 26.5 с использованием кросс-корреляции в режиме усреднения по 50 тыс. точек.

В табл. 2 и на рис. 2, *b* сравниваются измеренный фазовый шум S_g генератора на резонаторе $R1$ (рис. 2, *b*) и расчетный, полученный по формуле (5) в предположении, что источником шумов являются только вносимые шумы усилителя S_{ins} . Вносимые шумы усилителя при различных отстройках взяты из рис. 2, *a* и приведены в табл. 2. Как видно из таблицы, расчетные и измеренные значения фазовых шумов генератора на дисковом резонаторе $R1$ близки. Нами были проведены предварительные измерения фазового шума генератора с резонатором $R2$ в цепи обратной связи. При отстройке 10 kHz величина фазового шума составила -136.2 dBc/Hz. Этот результат также хорошо согласуется с оценкой, выполненной по формуле (5). Наблюдаемый

Таблица 2. Сравнение измеренного фазового шума S_g генератора на резонаторе $R1$ и расчетного, полученного в предположении, что источником шумов являются только вносимые шумы усилителя S_{ins}

Δf , kHz	1	2	5	10	50	100	220	3600
S_{ins} , dBc/Hz	-152	-154	-156	-159	-160	-165	-166	-175
S_g , dBc/Hz	-102.9	-112	-124.6	-133	-147	-157	-162	-175.1
$10 \lg[(\Pi/\Delta f)^2 + 1]$, dB	47	41	33	27	13.2	7.8	3	0
$S_g = S_{ins} + 10 \lg[(\Pi/\Delta f)^2 + 1]$, dBc/Hz, расчет	-105	-113	-123	-132	-146.8	-157.2	-163	-175

в эксперименте подъем шума в области низких частот объясняется вносимыми шумами усилителя в низкочастотной области.

Хорошее совпадение экспериментальных результатов с оценкой при частотах отстройки от несущей 1–100 кГц свидетельствует о том, что резонатор не имеет аномально больших источников фликкер-шума. Это позволяет утверждать перспективность использования генераторов на основе ВТСП-резонаторов для задач, где требуется низкий уровень шума на малых отстройках от несущей, и, следовательно, решение задачи снижения уровня шума будет определяться только оптимальностью построения генератора, повышением добротности резонатора и уровнем шума усилителя.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что дисковый резонатор на основе пленок YBCO не вносит дополнительных шумов и, следовательно, может рассматриваться как перспективное устройство при создании СВЧ-генераторов с предельно низким уровнем фазового шума. По нашим оценкам собственная добротность резонатора, помещенного в корпус, может быть повышена до 50 000–70 000 за счет совершенствования технологии нанесения пленок YBCO, а также за счет оптимизации конструкции резонатора и корпуса. Нетрудно заметить, что в этом случае в предложенной схеме генератора могут быть достигнуты фазовые шумы порядка -143 дБс/Гц при отстройке от несущей на 10 кГц.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ и при использовании оборудования ЦКП ИФМ РАН.

Список литературы

- [1] *Riddle A.* // IEEE Microwave magazine. 2010. V. 11. Iss. 6. P. 70.
- [2] *Ченакин А.* // Электроника НТБ. 2011. Вып. 4. С. 52.
- [3] *Chenakin A.* // Microwave J. 2009. V. 52. Iss. 10. P. 124.
- [4] *Мастеров Д.В., Павлов С.А., Парафин А.Е.* // Известия РАН. Сер. Физ. 2012. Т. 76. В. 2. С. 169.
- [5] *Zuccaro C., Winter M., Klein N., Urban K.* // J. Appl. Phys. 1997. V. 82. N 11. P. 5695.
- [6] *Phillips J.M.* // J. Appl. Phys. 1996. V. 79. N 4. P. 1829.
- [7] *Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств* / Под ред. В.И. Вольмана. М.: Радио и связь, 1982. 328 с.

- [8] *Turneaure J.P., Halbritter J., Schwettman H.A.* // J. Supercond. 1991. V. 4. N 5. P. 341.
- [8] *Есипенко В.И., Свешников Б.В., Кревский И.М.* // XVIII Международная научно-техническая конференция „Информационные системы и технологии“ ИСТ — 2012. С. 61.
- [9] *Есипенко В.И., Свешников Б.В., Кревский И.М.* // XVIII Международная научно-техническая конференция „Информационные системы и технологии“ ИСТ — 2012. С. 62.
- [10] *Leeson D.B.* // Proc. of IEEE. 1966. V. 54. N 2. P. 329.