

09

Измерение нелинейных резонансных структур

© Д.В. Мастеров, С.А. Павлов, А.Е. Парафин

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород
E-mail: parafin@ipm.sci-nnov.ru

Поступило в Редакцию 5 ноября 2008 г.

Предложен метод характеристики нелинейных резонансных систем. Основой метода является измерение зависимости коэффициента передачи от частоты при постоянной амплитуде колебаний в резонаторе. При этом характеристики нелинейного резонатора — величина потерь и резонансная частота, зависящие от амплитуды колебаний, остаются неизменными для всех точек резонансной кривой. Такую ситуацию можно реализовать путем измерений при фиксированной выходной мощности. При этом подходе в отличие от стандартной амплитудно-частотной характеристики, получаемой при постоянной входной мощности, резонансная кривая будет иметь лоренцевскую форму даже в случае сильно нелинейной системы независимо от реализующегося механизма нелинейности, что позволяет корректно ввести и определить величину добротности, постоянную на всей измеренной резонансной кривой. Для иллюстрации предложенного метода проведены измерения сверхпроводящего фильтра в нелинейном режиме.

PACS: 83.85.Nc, 84.30.Vn, 85.25.-j

Исследование нелинейных свойств материалов, в частности зависимости импеданса высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) $Z_S = R_S + iX_S$ от высокочастотного магнитного поля H или тока I , представляет интерес как для практических применений, так и с точки зрения изучения фундаментальных свойств материала. Обычно для получения зависимостей $Z_S(H)$ и $Z_S(I)$ проводят измерения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) резонансных систем как функции входной мощности P_{in} . Такие АЧХ нелинейных структур имеют нелоренцевскую форму [1,2]. Нелоренцевская форма получаемых резонансных кривых при наличии нелинейности связана с тем, что различным точкам АЧХ соответствуют разные величины магнитного поля (или электрического тока) в измеряемой резонансной структуре и соответственно различные величины действительной R_S и мнимой X_S частей импеданса.

В работах [2] и [3] предложены методы обработки нелинейных АЧХ, полученных при фиксированной входной мощности и имеющих ярко выраженную лоренцевскую форму. Мы предлагаем вместо АЧХ при фиксированной входной мощности измерять частотную зависимость коэффициента передачи резонансной структуры при фиксированной величине амплитуды поля (тока) в исследуемой структуре, что реализуется при фиксированном уровне выходного сигнала P_{out} . При таком подходе фиксируются резонансная частота и величина потерь за период; и резонансная кривая, даже в случае сильно нелинейной системы, будет иметь лоренцевскую форму независимо от реализующегося механизма нелинейности, что позволяет корректно ввести и определить величину добротности, постоянную на всей измеренной резонансной кривой, и, следовательно, определить характеристики резонатора.

Добротность линейной резонансной системы определяется через отношение запасенной в системе энергии W к средней за период колебаний мощности потерь P_d :

$$Q_L = \frac{\omega W}{P_d}. \quad (1)$$

Резонансная кривая при измерении резонатора с двумя элементами связи представляет собой зависимость коэффициента передачи резонатора от частоты $T(f) = P_{out}/P_{in}$, где P_{out} и P_{in} — мощность на входе и выходе резонатора. Для линейной системы зависимость коэффициента передачи описывается формулой [4]:

$$T(f) = \frac{T(f_0)}{1 + 4Q_L^2 \delta^2}, \quad (2)$$

где f_0 — резонансная частота, δ — относительная расстройка от резонансной частоты, определяемая выражением:

$$\delta = \frac{f - f_0}{f_0}, \quad (3)$$

$T(f_0)$ — коэффициент передачи на резонансной частоте. Величина нагруженной добротности может быть определена из формул (2) и (3) через ширину резонансной кривой по заданному уровню. Для уровня -3 dB это соотношение выражается формулой

$$Q_L = \frac{f_0}{\Delta f_{-3 \text{ dB}}}, \quad (4)$$

где $\Delta f_{-3 \text{ dB}}$ — ширина резонансной кривой по уровню -3 dB.

Особо следует отметить тот факт, что при измерении резонансной кривой $T(f)$ линейной системы не возникает вопрос о том, при какой мощности проводить измерения и какую мощность фиксировать — входную или выходную, так как выбор способа измерения не влияет на результат. Это связано с тем, что свойства линейной системы не зависят от амплитуды колебаний в ней. Вообще говоря, в каждой частотной точке можно устанавливать произвольное значение входной мощности или подбирать заданное значение выходной — получаемая зависимость от этого не изменится. Поэтому способ измерения выбирается исключительно из соображений простоты реализации.

Для нелинейной структуры измеряемая резонансная кривая $T(f) = P_{out}/P_{in}$ зависит не только от абсолютного значения мощности, при котором проводятся измерения, но и от того, какая мощность — входная или выходная — фиксируется. Общепринятый метод измерения резонансной кривой при постоянной входной мощности приводит к тому, что различным частотным точкам резонансной кривой соответствует разная амплитуда колебаний в исследуемой резонансной структуре и, следовательно, различные значения потерь и резонансной частоты. При больших отстройках от резонансной частоты амплитуда колебаний мала и форма резонансной кривой соответствует линейному режиму. При приближении к резонансу амплитуда колебаний растет, что приводит к изменению величин R_S и X_S . Увеличение потерь (R_S) приводит к уменьшению коэффициента передачи вблизи резонанса, поэтому вершина резонансной кривой становится более плоской и кривая становится шире, увеличение X_S приводит к сдвигу резонансной частоты и, следовательно, к искривлению резонансной кривой [5].

Предлагаемое нами измерение резонансной кривой $T(f) = P_{out}/P_{in}(f)$ при постоянной выходной мощности, хотя и усложняет процедуру измерения, позволяет зафиксировать одинаковую амплитуду колебаний в исследуемой системе при изменении частоты. Это приводит к постоянству величин R_S и X_S во всех точках измеряемой кривой вне зависимости от механизма нелинейности, что позволяет корректно определить значение добротности, например, используя формулу (4), и в конечном итоге — величину потерь в резонаторе при заданной амплитуде колебаний.

Для иллюстрации предложенного метода были проведены измерения ВТСП фильтра [6]. На рис. 1 приведен пример определения добротности при заданном уровне мощности на выходе фильтра, равном

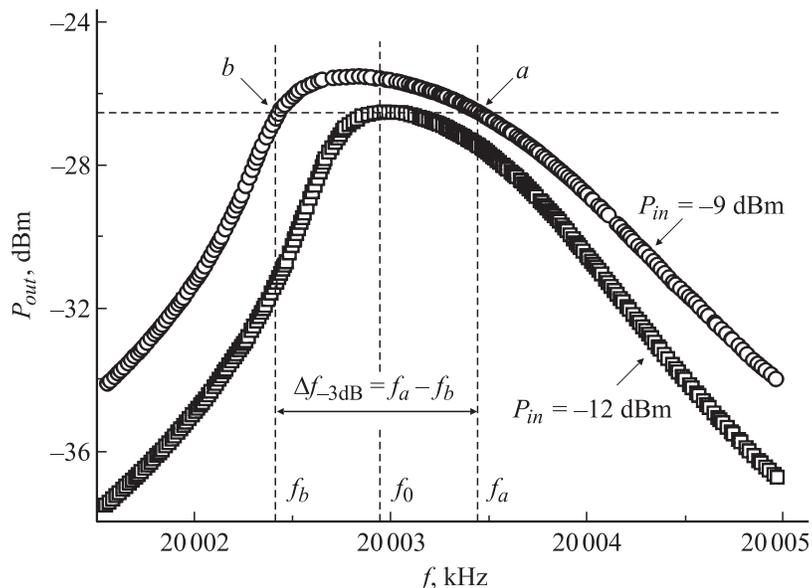


Рис. 1. Нелинейные АЧХ ВТСП фильтра, полученные при значениях входной мощности P_{in} , равных -12 и -9 dBm. Ширина полосы фильтра, определяемая предложенным методом по двум АЧХ, обозначена, как $\Delta f_{-3\text{dB}}$.

-27 dBm. На рисунке приведены две АЧХ, полученные при значениях входной мощности -12 и -9 dBm, т.е. отличающихся на 3 dB. Горизонтальная линия, соответствующая максимальному значению АЧХ при -12 dBm, пересекает вторую АЧХ в точках a и b , соответствующих той же самой амплитуде выходного сигнала. Коэффициент передачи на частотах в точках пересечения уменьшается на 3 dB (мощность на выходе фильтра осталась прежней, входная мощность увеличилась на 3 dB). Следовательно, разность частот $f_a - f_b$ есть ширина искомой резонансной кривой, равной $\Delta f_{-3\text{dB}} = 1$ kHz при $P_{out} = -27$ dBm. Частоты f_a и f_b расположены симметрично относительно частоты $f_0 = 20$ MHz, соответствующей максимуму нижней кривой. Эта частота является резонансной при $P_{out}(f) = -27$ dBm. Значение добротности, вычисленное по формуле (4), составляет $20\,000$.

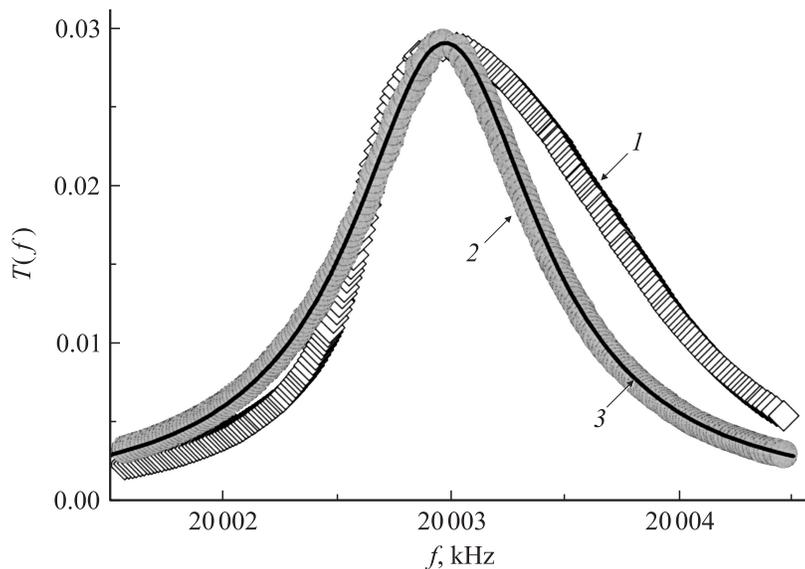


Рис. 2. Зависимости коэффициента передачи ВТСП фильтра от частоты.

На рис. 2 представлены зависимости коэффициента передачи ВТСП фильтра от частоты. Кривая 1 получена при фиксированной входной мощности $P_{in}(f) = -12$ dBm — стандартная АЧХ. Кривая 2 получена при фиксированной выходной мощности $P_{out}(f) = -27$ dBm. Эта мощность соответствует выходной мощности в максимуме коэффициента передачи кривой 1, т.е. в максимуме обеих зависимостей амплитуды колебаний в резонансной системе совпадают. Резонансная кривая 2 очень хорошо совпадает с теоретической зависимостью (2), представляющей собой функцию Лоренца, которая показана на рис. 2 сплошной линией 3.

Предложенный метод определения добротности, использующий измерение частотной зависимости коэффициента передачи резонансной структуры при фиксированном уровне выходного сигнала, позволяет корректно ввести и определить величину добротности нелинейной системы. При этом не требуется каких-либо предположений о реализуемом механизме нелинейности.

Список литературы

- [1] Halbritter J. // J. Appl. Phys. 1970. V. 41. N 11. P. 4581.
- [2] Rao X.S., Ong C.K., Feng Y.P. // Electronics Letters. 2000. V. 36. N 3. P. 271.
- [3] Wang Y., Su H.T., Huang F. et al. // IEEE Trans. on Appl. Supercond. 2007. V. 17. N 2. P. 3632.
- [4] Гинзтон Э.Л. Измерения на сантиметровых волнах. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. 620 с.; Ginzton E.L. Microwave measurements. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1957.
- [5] Salkola M.I. // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86. N 20. P. 202506 (1).
- [6] Вopilкин Е.А., Парафин А.Е., Павлов С.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 16. С. 90.