

05:09

Оценка качества перестраиваемых СВЧ фильтров на сегнетоэлектрических конденсаторах

© В.В. Плескачев, И.Б. Вендик

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,
197376 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: mwlab@eltech.ru

(Поступило в Редакцию 18 марта 2003 г.)

Эффективность перестройки микрополосковых фильтров, которые используют сегнетоэлектрические конденсаторы в качестве управляющих элементов, зависит как от свойств конденсаторов, так и от характеристик резонаторов фильтра. Качество перестраиваемого фильтра, определяемое отношением частотного диапазона перестройки центральной частоты фильтра к его полосе пропускания, учитывает свойства резонаторов и характеристики сегнетоэлектрического конденсатора. Предложенный параметр качества позволяет оценить предельные характеристики перестраиваемых фильтров.

Введение

Планарные перестраиваемые фильтры могут найти широкое применение в современных телекоммуникационных системах. Существует несколько конкурирующих технологий создания перестраиваемых фильтров. Различия этих технологий обусловлены способом перестройки центральной частоты резонаторов фильтра: механическая перестройка [1], перестройка с использованием ферромагнитных сред [2], полупроводниковых варакторов [3], микроэлектромеханических (МЭМ) конденсаторов [4] и сегнетоэлектрических (СЭ) конденсаторов [5]. Последние три способа по существу используют электрически управляемые конденсаторы переменной емкости. Наиболее привлекательными представляются перестраиваемые фильтры на СЭ конденсаторах вследствие высокой скорости перестройки центральной частоты, а также простой технологии изготовления и низкой стоимости.

Характеристики перестраиваемого фильтра содержат тот же набор параметров, что и фильтр с фиксированной центральной частотой (ширина полосы пропускания, вносимые потери, крутизна фронтов и т.д.), однако их особенность заключается в том, что они должны быть определены на двух крайних центральных частотах диапазона перестройки фильтра — нижней и верхней. Обычно качество перестраиваемого фильтра оценивается как отношение ширины диапазона перестройки центральной частоты к средней геометрической величине его полос пропускания на нижней и верхней центральных частотах [6]. Такая оценка имеет существенный недостаток — она не включает в себя информацию о вносимых потерях фильтра. В данной статье представлен модифицированный параметр качества перестраиваемого фильтра, включающий вносимые потери. Представленный параметр качества зависит от добротности микрополосковых линий фильтра и потерь в СЭ конденсаторах. Он также зависит от коэффициента связи конденсаторов с микрополосковыми линиями резонаторов.

Перестраиваемые микрополосковые резонаторы

а) Структура резонаторов. Рассмотрим два типа микрополосковых резонаторов с СЭ конденсаторами. Схемы резонаторов представлены на рис. 1. Электрические длины микрополосковых линий резонаторов обозначены Θ_0 и Θ_g , C — переменная емкость СЭ конденсатора, зависящая от приложенного напряжения. Выбор данных резонаторов обусловлен удобством их реализации с использованием планарной технологии производства микрополосковых перестраиваемых фильтров.

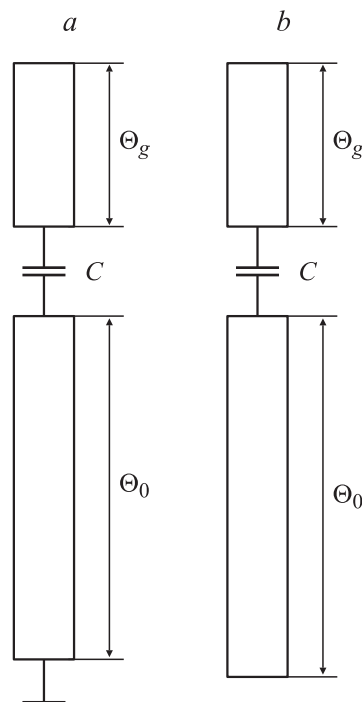


Рис. 1. Схема перестраиваемого микрополоскового резонатора на сегнетоэлектрических конденсаторах: *a* — короткозамкнутый резонатор, *b* — резонатор с открытыми концами.

б) Перестраиваемость резонаторов. Условия резонанса короткозамкнутого резонатора и резонатора с открытыми концами записываются соответственно

$$\frac{y_0}{\omega_0 C} - \tan(\Theta_0) + \cot(\Theta_g) = 0, \quad (1a)$$

$$\frac{y_0}{\omega_0 C} + \cot(\Theta_0) + \cot(\Theta_g) = 0, \quad (1b)$$

где Θ_0 и Θ_g — электрические длины отрезков линий, рассчитанные на резонансной частоте ω_0 .

Очевидно, что для существования резонанса должны быть соблюдены следующие условия для (1a) и (1b) соответственно

$$\tan(\Theta_0) - \cot(\Theta_g) > 0, \quad (2a)$$

$$\cot(\Theta_0) + \cot(\Theta_g) < 0. \quad (2b)$$

Введем параметр, определяющий диапазон перестройки резонатора через относительный сдвиг центральной частоты

$$\gamma = \omega_0^{up} / \omega_0^{low}, \quad (3)$$

где ω_0^{low} — нижняя центральная частота, ω_0^{up} — верхняя, $\gamma > 1$.

В дальнейшем условимся электрические длины Θ_0 и Θ_g рассчитывать на нижней частоте ω_0^{low} , на верхней центральной частоте они будут равны $\gamma\Theta_0$ и $\gamma\Theta_g$ соответственно. Используя выражение (3), условия резонанса (1a) и (1b) можно преобразовать к виду

$$\frac{n}{\gamma} = \frac{\tan(\gamma\Theta_0) - \cot(\gamma\Theta_g)}{\tan(\Theta_0) - \cot(\Theta_g)}, \quad (4a)$$

$$\frac{n}{\gamma} = \frac{\cot(\gamma\Theta_0) + \cot(\gamma\Theta_g)}{\cot(\Theta_0) + \cot(\Theta_g)}, \quad (4b)$$

где $n = C_1/C_2$ — „перестраиваемость“ СЭ конденсатора. Уравнения (4a) и (4b) решаются численно относительно γ . На рис. 2 и рис. 3 приведены зависимости коэффициента перестройки резонатора γ от электрических длин Θ_0 и Θ_g для конденсатора с управляемостью $n = 2$ для двух вариантов реализации резонаторов.

Максимальная величина относительного сдвига центральной частоты для короткозамкнутого резонатора равна 1.2 при $\Theta_0 = 45^\circ$ и $\Theta_g = 90^\circ$, для резонатора с открытыми концами относительный сдвиг центральной частоты равен 1.13 при $\Theta_0 = 120^\circ$ и $\Theta_g = 120^\circ$.

в) Добротность резонаторов. Добротность микрополосковых резонаторов с перестраиваемыми СЭ конденсаторами рассчитывается с использованием метода, представленного в [5]. Добротность короткозамкнутого резонатора определяется выражением

$$Q = Q_0 \times \frac{\frac{\Theta_0}{\cos^2(\Theta_0)} + \frac{\Theta_g}{\sin^2(\Theta_g)} + \tan(\Theta_0) - \cot(\Theta_g)}{\frac{\Theta_0}{\cos^2(\Theta_0)} + \frac{\Theta_g}{\sin^2(\Theta_g)} + (\tan(\Theta_0) - \cot(\Theta_g))2Q_0 \tan \delta}, \quad (5a)$$

где Q_0 — добротность микрополосковых линий, определяемая как отношение постоянной распространения в

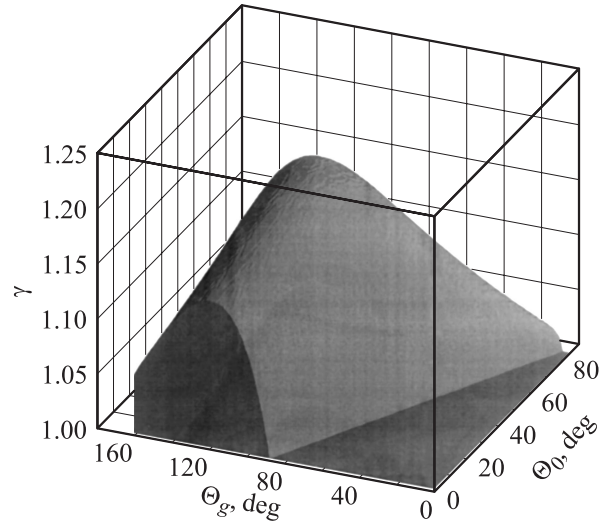


Рис. 2. Зависимость относительного сдвига центральной частоты короткозамкнутого резонатора от электрических длин микрополосковых секций.

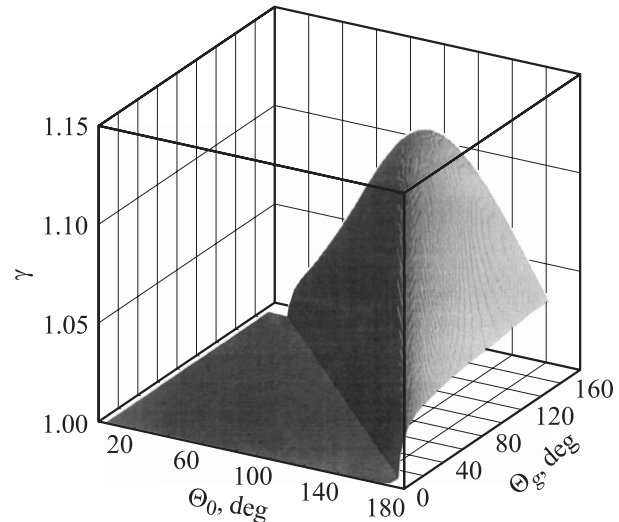


Рис. 3. Зависимость относительного сдвига центральной частоты резонатора с открытыми концами от электрических длин микрополосковых секций.

линии к удвоенной величине коэффициента затухания, $\tan \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь сегнетоэлектрического конденсатора.

Добротность резонатора с открытыми концами

$$Q = Q_0 \times \frac{\frac{\Theta_0}{\sin^2(\Theta_0)} + \frac{\Theta_g}{\sin^2(\Theta_g)} - (\cot(\Theta_0) + \cot(\Theta_g))}{\frac{\Theta_0}{\sin^2(\Theta_0)} + \frac{\Theta_g}{\sin^2(\Theta_g)} - (\cot(\Theta_0) + \cot(\Theta_g))2Q_0 \tan \delta}. \quad (5b)$$

Как и в случае с резонансными условиями, только определенное множество пар электрических длин, удо-

влетворяющих неравенствам (2a) и (2b), допустимы при расчете добротности.

Параметр качества перестраиваемого фильтра

Существует эмпирическое соотношение, связывающее вносимые потери фильтра (в децибеллах) с собственной добротностью резонаторов этого фильтра [7]

$$L = \frac{4.34N}{(\Delta\omega_f/\omega_{0f})Q}, \quad (6)$$

где N — порядок фильтра, $\Delta\omega_f$ — ширина полосы пропускания фильтра, ω_{0f} — центральная частота фильтра, Q — собственная добротность резонатора фильтра.

Поскольку добротность резонатора определяется выражением $Q = \omega_{0f}/\Delta\omega_r$, где $\Delta\omega_r$ — ширина резонансной характеристики (по уровню 3dB), то выражение (6) можно представить в следующем виде:

$$\Delta\omega_f = \Delta\omega_r \frac{4.34N}{L}. \quad (7)$$

Параметр качества перестраиваемого фильтра, определенный в [6] равен

$$F = \frac{\omega_0^{up} - \omega_0^{low}}{\sqrt{\Delta\omega_f^{up} \Delta\omega_f^{low}}}. \quad (8)$$

Используя выражение (7), преобразуем (8) к виду

$$F = \frac{\sqrt{L^{up}L^{low}}}{4.34N} \cdot \frac{\omega_0^{up} - \omega_0^{low}}{\sqrt{\Delta\omega_r^{up} \Delta\omega_r^{low}}} \quad (9)$$

и после дальнейших преобразований получим

$$F = \frac{\sqrt{L^{up}L^{low}}}{4.34N} \cdot \frac{\sqrt{\gamma} - 1/\sqrt{\gamma}}{\sqrt{(Q^{up})^{-1}(Q^{low})^{-1}}}, \quad (10)$$

где Q^{low} и Q^{up} — собственные добротности резонаторов фильтра на нижней и верхней центральных частотах соответственно, $\sqrt{L^{up}L^{low}}$ — средняя геометрическая величина потерь фильтра в обоих состояниях.

Возможно использовать другое определение параметра качества перестраиваемого фильтра F' , зависящее не только от числа полос перестройки, но и вносимых потерь

$$F' = F \cdot \frac{1}{\sqrt{L^{up}L^{low}}} = \frac{1}{4.34N} \cdot \frac{\sqrt{\gamma} - 1/\sqrt{\gamma}}{\sqrt{(Q^{up})^{-1}(Q^{low})^{-1}}}. \quad (11)$$

Модифицированный параметр качества перестраиваемого микрополоскового фильтра 3-го порядка представлен на рис. 4 и рис. 5 для фильтров, состоящих из короткозамкнутых и открытых резонаторов соответственно. Для расчетов модифицированного параметра качества

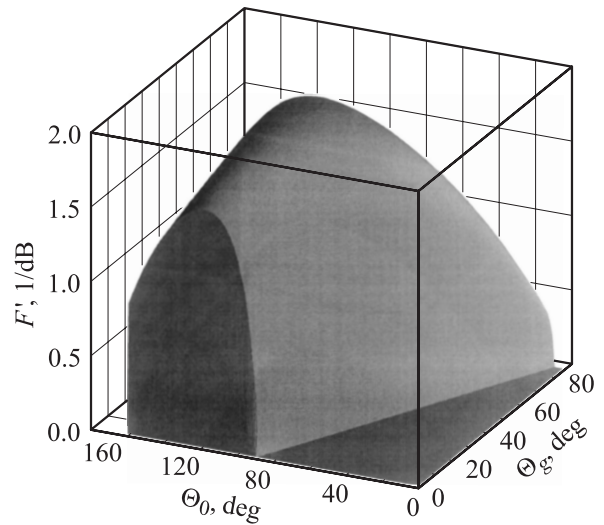


Рис. 4. Модифицированный параметр качества перестраиваемого фильтра на короткозамкнутых резонаторах.

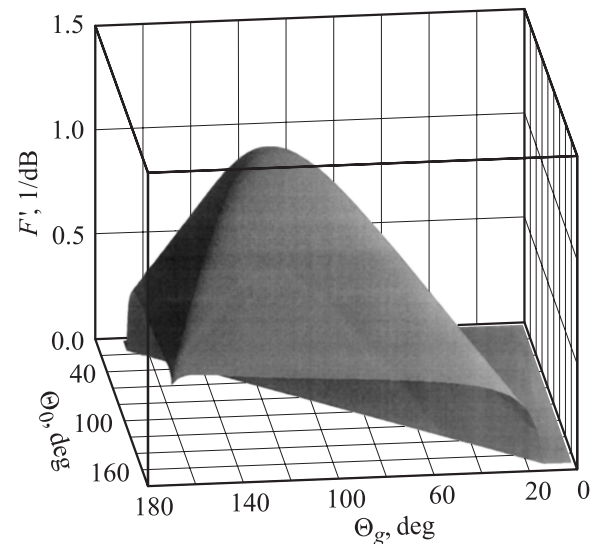


Рис. 5. Модифицированный параметр качества перестраиваемого фильтра на резонаторах с открытыми концами.

использовались параметры медных микрополосковых резонаторов на двухслойной диэлектрической подложке, состоящей из поликора толщиной 0.5 mm и слоя BSTO толщиной 1 μm (диэлектрическая проницаемость — 1000, тангенс угла диэлектрических потерь — 0.01). СЭ конденсаторы в данном случае являются неотъемлемой частью топологии и представляют собой зазоры шириной 5–10 μm между двумя отрезками микрополосковой линии резонатора. Ширина зазоров подбирается так, чтобы обеспечить необходимую емкость конденсаторов. Для расчетов были взяты следующие параметры СЭ конденсаторов ($n = 2$): $\tan \delta_{low} = 0.01$ (при нулевом управляющем напряжении), $\tan \delta_{up} = 0.005$ (при максимальном управляющем напряжении). Топология перестраиваемого микрополоскового фильтра приведена

на рис. 6. Каждый из резонаторов фильтра имеет специальную цепь подачи напряжения смещения для управления величиной емкости СЭ конденсатора. Измеренные и расчетные характеристики фильтра представлены на рис. 7. Центральная частота фильтра сдвигается от 4.4 до 4.65 GHz. Вносимые потери при этом уменьшаются от 15 до 8 dB. Среднегеометрическая ширина полосы пропускания равна 80 MHz. В табл. 1 представлены параметры СЭ конденсатора при различных управляющих напряжениях, извлеченные из экспериментальных характеристик фильтра. Параметр качества экспериментального фильтра $F'_{\text{exp}} = 0.34 \text{ (dB}^{-1}\text{)}$, что очень хорошо согласуется с расчетной величиной $F'_{\text{calc}} = 0.38 \text{ (dB}^{-1}\text{)}$.

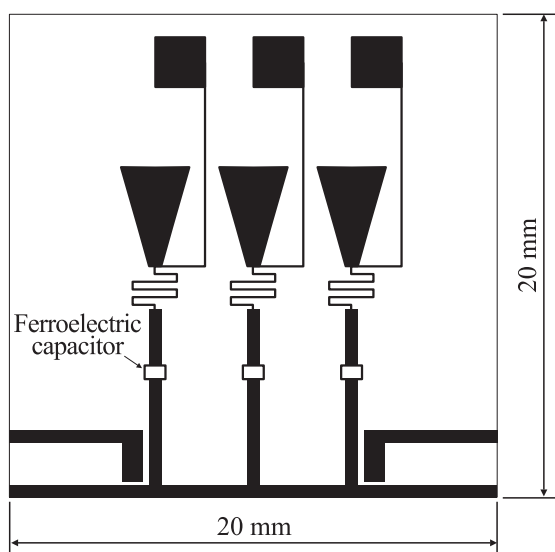


Рис. 6. Топология экспериментального перестраиваемого фильтра на короткозамкнутых резонаторах.

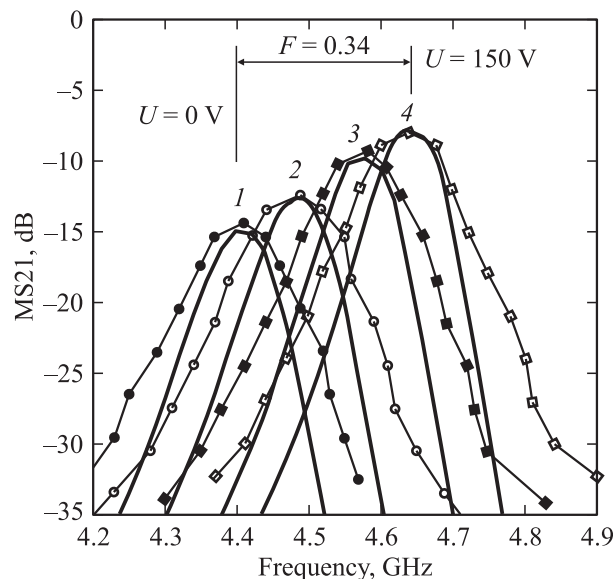


Рис. 7. Экспериментальные и расчетные характеристики перестраиваемого фильтра, показанного на рис. 6.

Таблица 1. Параметры планарного СЭ конденсатора на пленке BSTO, соответствующие характеристикам рис. 7

№ состояния	u, V	C, pF	$\tan \delta$
1	0	0.35	0.044
2	50	0.29	0.034
3	100	0.23	0.023
4	150	0.19	0.017

Таблица 2. Модифицированный параметр качества перестраиваемого микрополоскового фильтра с идеальными микрополосковыми линиями

K	N	$F', 1/\text{dB}$
5000	2	4.1
	3	2.7
	4	2.0
15000	2	7.1
	3	4.7
	4	3.5
	5	2.8

В случае, когда добротность микрополосковых линий велика по сравнению с обратной величиной $\tan \delta$ СЭ конденсатора, модифицированный параметр качества не зависит от электрических длин микрополосков резонатора. Расчеты показывают, что при выполнении условия $Q_0 \gg \tan \delta^{-1}$ (например, при использовании сверхпроводниковых микрополосковых линий) модифицированный параметр качества перестраиваемого микрополоскового фильтра зависит только от порядка фильтра N и коммутационного качества СЭ конденсатора K , определяемого выражением [6]

$$K = \frac{(n-1)^2}{n \tan \delta_{\text{low}} \tan \delta_{\text{up}}}. \quad (12)$$

При этом модифицированный параметр качества перестраиваемого фильтра описывается формулой

$$F' = \frac{1}{8.68N} \sqrt{K}. \quad (13)$$

Модифицированный параметр качества перестраиваемого фильтра без потерь в микрополосковых линиях является предельной величиной, которая может быть достигнута при использовании перестраиваемых конденсаторов данного качества. Оценка этого предела представлена в табл. 2 для фильтров различного порядка, использующих конденсаторы различного качества. На частоте 10 GHz коммутационное качество лучших образцов СЭ конденсаторов порядка 5000.

Заключение

Представлены предельные характеристики перестраиваемых микрополосковых фильтров. Введен модифицированный параметр качества перестраиваемых фильтров,

позволяющий оценить характеристики перестраиваемого фильтра в зависимости от параметров микрополосковых линий фильтра и качества управляющих конденсаторов.

Авторы благодарят О.Г. Вендика за плодотворную дискуссию.

Работа выполнена в рамках проекта „Разработка физических и технологических основ микроэлектронных приемопередающих устройств СВЧ диапазона на основе сверхпроводящих пленок и слоистых структур“ (НИР / Министерство науки, промышленности и технологии РФ, № 239 СП/МЛП-10, 2002).

Список литературы

- [1] *Xu H., Gao E., Ma Q.Y.* // IEEE Trans. on Applied Supercond. 2001. Vol. 11. P. 353–356.
- [2] *Oates D.E., Dionne G.F.* // IEEE Trans. on Applied Supercond. 1999. Vol. 9. N 2. P. 4170–4173.
- [3] *Brown A.R., Rebeiz G.M.* // IEEE Trans. Microwave Theory and Tech. 2000. Vol. MTT-48. N 7. P. 1157–1160.
- [4] *Peroulis D., Pacheco S., Sarabandi K., Katehi L.P.B.* // IMS. Dig. 2001. Vol. 1. P. 341–344.
- [5] *Vendik I., Vendik O., Pleskachev V., Nikol'sky M.* // Integrated Ferroelectrics. 2002. Vol. 49. P. 83–92.
- [6] *Vendik I.B., Vendik O.G., Kollberg E.L.* // Proc. 29th EuMC. Munich (Germany), 1999. Vol. 3. P. 187–190.
- [7] *Matthaei G., Young L., Jones E.M.T.* Microwave Filters, Impedance-matching Networks and Coupling Structures. Artech House Inc., 1980.