

05;09

## Коммутационное качество электрически управляемых СВЧ-компонентов

© В.В. Плескачев, И.Б. Вендик

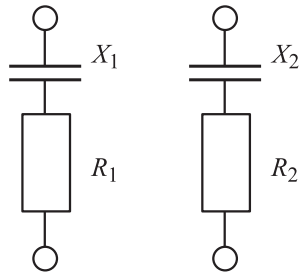
С.-Петербургский государственный электротехнический университет  
„ЛЭТИ“

E-mail: mwlab@eltech.ru

В окончательной редакции 26 июня 2003 г.

Сравнение различных компонентов на основе электрически управляемого конденсатора может быть выполнено с использованием интегрального критерия — коммутационного качества, который определяется эффективностью перестройки емкости и величиной потерь в управляющем устройстве. Независимость коммутационного качества от физической природы управляемых компонентов позволила выполнить сравнительный анализ эффективности электрически перестраиваемых емкостных компонентов, используемых в СВЧ-диапазоне:  $p-i-n$ -диода, микроэлектромеханических ключей, варикапа на управляемой емкости  $p-n$ -перехода и сегнетоэлектрического конденсатора.

**1. Введение.** При разработке перестраиваемых СВЧ-устройств, таких как перестраиваемые фильтры, фазовращатели и других, возникает проблема выбора электрически управляемых компонентов, являющихся оптимальными для создания конкретного устройства с точки зрения получения требуемых характеристик этого устройства. Рассмотрим класс управляемых компонентов диапазона СВЧ, которые могут быть представлены эквивалентной электрически управляемой емкостью. Существует два основных метода управления величиной емкости таких компонентов — переключение и плавная перестройка. Переключаемые компоненты характеризуются двумя состояниями, соответствующими двум величинами емкости, в то время как емкость перестраиваемых компонентов изменяется плавно в некотором диапазоне. К переключаемым устройствам относятся полупроводниковые  $p-i-n$ -диоды и микроэлектромеханические (МЭМ) конденсаторы, а полупроводниковые диоды с управляемым  $p-n$ -переходом (варикапы) и сегнетоэлектрические конденсаторы — к перестраиваемым устройствам.



**Рис. 1.** Эквивалентная схема управляемого емкостного компонента в двух состояниях.

Полупроводниковый  $p-i-n$ -диод в случае подачи прямого напряжения смещения представляет собой структуру с малым сопротивлением (короткое замыкание) за счет инжекции носителей заряда из сильно легированных  $p$ - и  $n$ -областей в центральную высокоомную область базы. При обратном смещающем напряжении  $p-i-n$ -диод является конденсатором, диэлектриком которого служит область базы [1]. МЭМ-конденсаторы — миниатюрные механические системы, состоящие из электродов, разделенных воздушным промежутком. Расстояние между электродами таких конденсаторов изменяется под действием кулоновских сил притяжения, возникающих из-за наличия на электродах зарядов противоположных знаков, наведенных приложенным управляющим напряжением [2]. В полупроводниковом варикапе, находящемся под управляющим напряжением обратного смещения, барьерная емкость  $p-n$ -перехода изменяется под действием этого напряжения вследствие изменения ширины обедненной области [3]. Емкость перестраиваемого сегнетоэлектрического конденсатора зависит от управляющего напряжения вследствие того, что диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрических материалов зависит от величины приложенного к ним электрического поля [4].

Для сравнения вышеперечисленных емкостных управляемых компонентов целесообразно использовать универсальный параметр — коммутационное качество, который зависит от емкости и потерь в двух состояниях, соответствующих двум крайним значениям емкости диапазона перестройки или переключения [5].

**2. Коммутационное качество электрически управляемых конденсаторов.** Эквивалентная схема управляемого емкостного компонента представлена на рис. 1. Коммутационное качество определяется следующим выражением [5]:

$$K = \frac{(X_1 - X_2)^2}{R_1 R_2}, \quad (1)$$

где  $Z_1 = R_1 + jX_1$  и  $Z_2 = R_2 + jX_2$  — величины полных сопротивлений компонента в двух состояниях, соответствующих разным напряжениям смещения. Определим коммутационное качество для различных компонентов.

*А. p-i-n-диод.* Для описания эквивалентной схемы p-i-n-диода используются три параметра: сопротивление  $r_+$  для диода под прямым смещением, сопротивление  $r_-$  и емкость  $C$ , включенные последовательно, для диода под обратным смещением. Используя выражение (1), получим

$$K = \frac{1}{(\omega C)^2 r_+ r_-}. \quad (2)$$

Для характерных параметров p-i-n-диода [1]  $C = 0.3$  пФ,  $r_+ = r_- = 0.7 \Omega$  на частоте 10 GHz получим  $K = 5.7 \cdot 10^3$ .

*Б. МЭМ-конденсатор.* МЭМ-конденсатор имеет подвижный электрод, отделенный от неподвижного электрода воздушным промежутком. На неподвижный электрод наносится тонкий диэлектрический слой с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r$ . При подаче смещения подвижный электрод притягивается к неподвижному, при этом два электрода с тонким диэлектрическим слоем между ними образуют конденсатор с емкостью  $C_1$ . Реактивное сопротивление такого конденсатора  $X_1 = \frac{1}{\omega C_1}$ , а сопротивление  $R_1 = R + \frac{\tan \delta}{\omega C_1}$  равно сумме сопротивления обкладок  $R$  и сопротивления потерь в тонком диэлектрическом слое, где  $\tan \delta$  — тангенс угла диэлектрических потерь тонкого диэлектрического слоя на неподвижном электроде. При нулевом смещении подвижный электрод возвращается в исходное состояние и промежуток между электродами состоит из двух слоев: воздушного зазора и тонкого диэлектрического слоя на неподвижном электроде. Емкость такого конденсатора  $C_2$ , причем  $C_2 < C_1$  и  $X_2 = \frac{1}{\omega C_2}$ , а активное сопротивление определяется только вкладом электродов конденсатора и равно  $R_2 = R$ .

Коммутационное качество МЭМ-конденсатора равно

$$K = \frac{\left(\frac{1}{\omega C_1} - \frac{1}{\omega C_2}\right)^2}{R_1 R_2}. \quad (3)$$

Типичные параметры эквивалентной схемы МЭМ-конденсатора [2]  $C_1 = 3.4$  pF,  $C_2 = 0.04$  pF,  $R = 0.2$   $\Omega$ ,  $\tan \delta = 0.001$  и коммутационное качество на частоте 10 GHz  $K = 3.8 \cdot 10^6$ .

*В. Сегнетоэлектрический конденсатор.* Эквивалентная схема сегнетоэлектрического конденсатора описывается четырьмя параметрами: сопротивлением  $r_1$  и емкостью  $C_1$  в состоянии при нулевом смещающем напряжении, сопротивлением  $r_2$  и емкостью  $C_2$  в состоянии при некотором смещающем напряжении. В соответствии с (1) получаем

$$K = \frac{\left(\frac{C_1}{C_2} - 1\right)^2}{(\omega C_2)^2 r_1 r_2}. \quad (4)$$

Обычно (4) используют в виде [5]:

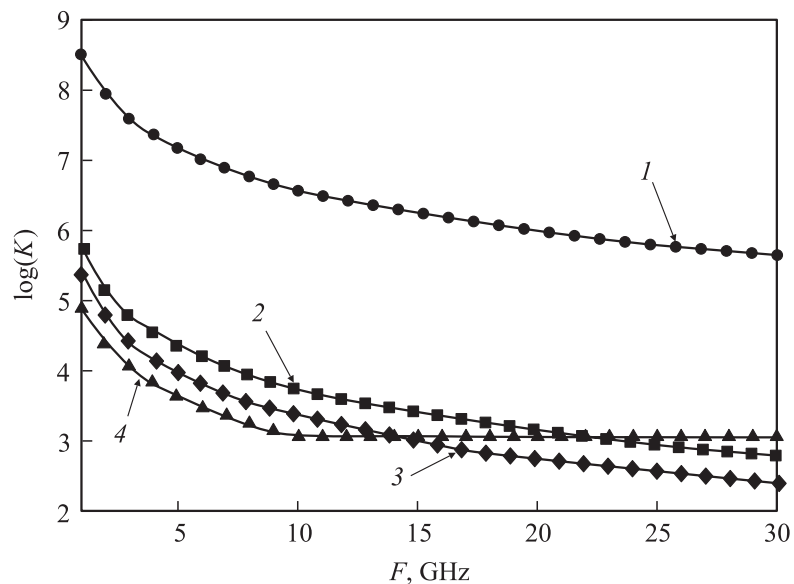
$$K = \frac{(n - 1)^2}{n \cdot \tan \delta_1 \cdot \tan \delta_2}, \quad (5)$$

где  $n = C_1/C_2$  — управляемость конденсатора,  $\tan \delta_1$  и  $\tan \delta_2$  — тангенсы угла диэлектрических потерь конденсатора в обоих состояниях.

На практике коммутационное качество сегнетоэлектрического конденсатора равно коммутационному качеству сегнетоэлектрической пленки, из которой этот конденсатор изготовлен, и не зависит от геометрических размеров конденсатора.

Для сегнетоэлектрической пленки хорошего качества характерны следующие параметры [6]:  $n = 2$ ,  $\tan \delta_1 = 0.015$ ,  $\tan \delta_2 = 0.007$ . Тангенс угла диэлектрических потерь сегнетоэлектрических пленок не имеет ярко выраженной зависимости от частоты в диапазоне 10–30 GHz [7]. Коммутационное качество хороших образцов сегнетоэлектрических конденсаторов  $K = 5 \cdot 10^3$  на частоте 10 GHz.

*Г. Полупроводниковый диод с управляемой емкостью p–n-перехода (варикап).* Для описания эквивалентной схемы варикапа используются четыре параметра: емкость  $C_1$  при нулевом напряжении на переходе, емкость  $C_2$  при некотором обратном напряжении смещения, последовательное сопротивление контактов  $r$  и параллельное  $R$  в обоих



**Рис. 2.** Частотная зависимость коммутационного качества управляемых емкостных компонентов: 1 — МЕМ-конденсатор, 2 —  $p-i-n$ -диод, 3 — варикап, 4 — СЭ-конденсатор.

состояниях, учитывающее потери в  $p-n$ -переходе. Параметры эквивалентной схемы управляемого емкостного элемента (рис. 1) связаны с параметрами эквивалентной схемы варикапа следующим образом:

$$R_1 = r + \frac{1}{(\omega C_1)^2 R}, \quad R_2 = r + \frac{1}{(\omega C_2)^2 R}. \quad (6)$$

$R$  зависит от величины управляющего напряжения. Характерные параметры эквивалентной схемы варикапа [5]:  $C_1 = 0.5$  pF,  $C_2 = 0.17$  pF,  $R = 1$  M $\Omega$ ,  $r = 0.8$   $\Omega$ . Для упрощения расчетов взято среднее значение  $R$ , так как изменение этого сопротивления при изменении величины управляющего напряжения невелико; в рассматриваемом частотном диапазоне данное сопротивление относительно мало влияет на величину коммутационного качества. Коммутационное качество варикапа на частоте 10 GHz  $K = 3 \cdot 10^3$ .

Характеристики управляемых компонентов

	<i>p-i-n</i> -диод	МЭМ-конденсатор	СЭ-конденсатор	Варикап
Управляемость $n = C_1/C_2$	—	100	1.5–2	2–4
Коммутационное качество	Среднее	Высокое	Среднее	Среднее
Время переключения, s	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-10}$	$10^{-6}$
Потребляемая мощность	Высокая	Малая	Малая	Малая
Стоимость	Высокая	Средняя	Малая	Высокая
Технологичность*	Средняя	Высокая	Высокая	Средняя
Надежность	Средняя	Малая	Высокая	Средняя

\* Технологичность СВЧ-устройства в планарном исполнении, содержащего управляемый конденсатор.

**3. Сравнение коммутационного качества управляющих емкостных компонентов в диапазоне частот 1–30 GHz.** На рис. 2 представлена расчетная зависимость коммутационного качества рассмотренных электрически управляемых компонентов от частоты в диапазоне 1–30 GHz. Для расчета использованы эквивалентные параметры компонентов, приведенные в предыдущем разделе. Для сегнетоэлектрического конденсатора использована частотная зависимость  $\tan \delta$ , приведенная в работе [7].

Сравнение характеристик управляющих компонентов приведено в таблице.

**4. Заключение.** Рассмотрена частотная зависимость коммутационного качества различных управляющих емкостных компонентов в диапазоне 1–30 GHz. Приведены характеристики этих компонентов.

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] *Хижя Г.С., Вендик И.Б., Серебрякова Е.А.* СВЧ фазовращатели и переключатели. М.: Радио и связь, 1984.
- [2] *Peroulis D., Pacheco S.P., Sarabandi K., Katehi L.P.B.* // IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. Jan. 2003. V. 51. P. 259–270.
- [3] *Vendik O.G., Zubko S.P.* // Integrated Ferroelectrics. 2001. V. 34. P. 215–226.
- [4] *Vendik I.B., Vendik O.G., Kollberg E.L.* // Proc. of 29th EuMC. October, 1999. V. 3. 29th. P. 187–190.
- [5] *Vendik I.B., Vendik O.G., Kollberg E.L.* // IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech. May 2000. V. 48. P. 802–808.
- [6] *Horwitz J.S., Chang W., Carter A.C., Pond J.M., Kirchofer S.W., Chrisey D.B., Levy J., Hubert C.* // Integrated Ferroelectrics. 1998. V. 22. N 1–4. P. 278–289.
- [7] *Vendik O.G., Zubko S.P., Nikol'ski M.A.* // Journal of Applied Physics. 2003 (in print).