

Сегнетоэлектрический управляемый СВЧ конденсатор с увеличенным уровнем IP3

А.Г. Гагарин, А.В. Тумаркин, А.Е. Комлев, П.В. Трофимов, Р.А. Платонов, Т.К. Легкова, А.М. Сосунов, А.Д. Иванов, А.Б. Козырев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: представлен СВЧ конденсатор планарной конструкции на основе плёнки титаната бария-стронция, выполненный в интегральном виде по схеме цепи планарных конденсаторов встречно-штыревой конструкции с последовательным приложением СВЧ сигнала и параллельной подачей напряжения управления через резистивную развязку. Проведена оценка зависимости величины IP3 от параметров управляемости конденсатора и от количества конденсаторов в цепи. На частоте 2 ГГц проведены измерения малосигнальных СВЧ параметров и измерения величины IP3 при подаче бигармонического СВЧ сигнала мощностью 10 Вт. Измеренная величина IP3 достигает 90 дБм, что соответствует предварительным оценкам для представленной конструкции.

Ключевые слова: сегнетоэлектрический конденсатор, управляемость, последовательно-параллельная схема, интермодуляционные искажения, IP3

1. Введение

Использование сегнетоэлектрических (СЭ) конденсаторов в технике СВЧ является предметом исследований и обсуждений уже несколько десятилетий, однако есть лишь единичные случаи развития этого направления до коммерческой реализации [1,2]. Внедрение данной технологии затрудняет ряд объективных недостатков, самыми критическими из которых являются малая управляемость при подаче высоких управляющих напряжений. В то же время эта особенность СЭ планарных конденсаторов позволяет их успешное использование СВЧ устройствах, работающих на повышенном уровне мощности [3], когда требуется подавление возникающих интермодуляционных искажений. Естественным способом ещё большего снижения интермодуляции с сохранением управления является распределение сигнального напряжения по последовательной цепи конденсаторов при том, что управляющее напряжение подаётся параллельно на каждый конденсатор в этой цепи [4]. Для развязки сигнальной цепи и цепи управления последняя подключается через ФНЧ, который могут формироваться с помощью активных [5] (резисторы) или реактивных [6] (индуктивности) элементов.

В настоящей работе рассмотрен перестраиваемый СЭ конденсатор, реализованный как последовательная цепь конденсаторов с использованием резистивной развязки.

2. Оценка параметров конденсатора

При приложении гармонического двухтонового сигнала к конденсатору, ёмкость которого зависит от напряжения (нелинейна), в токе, протекающем через конденсатор, возникают дополнительные интермодуляционные гармоники. С точки зрения уплотнения спектра передаваемых сигналов различных частот для нас самым главным является разностные частоты третьего порядка близкие к несущей каждого канала.

Предположим, что ёмкость зависит от напряжения по квадратичному закону, который в частности соответствует вольт-фарадной характеристике (ВФХ) СЭ конденсатора

$$C = C_0(1 - C_2U^2) \quad (1)$$

С учётом привязки к параметрам ВФХ конденсатора: номинальной ёмкости (C_0) и управляемости (K) при заданном напряжении (U_0) так, что $C(U_0) = C_0/K$ или $K = C_0/C(U_0)$, параметр C_2 определяется как

$$C_2 = \frac{K - 1}{K} \frac{1}{U_0^2} \quad (2)$$

Ток, протекающий через конденсатор, при приложении к нему двух тонового сигнала с амплитудой U_m и частотами ω_1 и ω_2 содержит гармоники основного сигнала и гармоники третьего порядка. Мощность, соответствующая равенству амплитуд токов основной и третьей гармоник, называется точкой IP3. Объектом измерения IP3, как правило, является выходная (ОIP3) или входная (IP3) мощности. Из-за деления и отражения мощности внутри электрической схемы измеряемые мощности зависят от способа включения нелинейного элемента в электрическую схему, то есть определяются не только характеристиками нелинейности элемента (K и U_0). Для удобства анализа можно вычислять IP3 элемента в схеме относительно фиксированной величины IP3₀₀, рассчитанной или измеренной для элемента с фиксированными характеристиками $K=K_{00}$ и $U_0=U_{00}$. При использовании мощности относительной к 1 мВт (дБм) можно записать [7,8]

$$\text{IP3[дБм]} = \text{IP3}_{00}[\text{дБм}] + 10 \lg\left(\frac{K}{K_{00}} \frac{K_{00} - 1}{K - 1}\right) + 20 \lg\left(\frac{U_0}{U_{00}}\right) \quad (3)$$

То есть, например, увеличение напряжения управления в 10 раз приведёт к увеличению IP3 в 100 раз или на 20 дБ.

В настоящей работе рассмотрен элемент, реализующий перестраиваемый конденсатор, как последовательную цепь конденсаторов с использованием резистивной развязки. Схема последовательно-параллельного конденсатора представлена на рисунке 1.

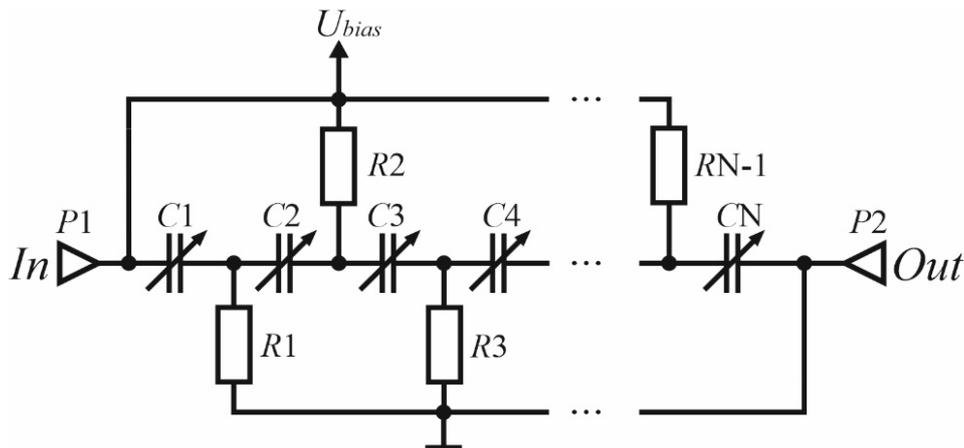


Рисунок 1. Схема последовательно-параллельного конденсатора.

В приближении, что диэлектрические потери конденсаторов малы (то есть величины не указанных на схеме эквивалентных сопротивлений диэлектрических потерь по параллельной схеме замещения велики), а величины сопротивлений R много больше, чем модуль реактивного сопротивления емкостей C , интермодуляционные искажения в схеме, представленной на рисунке 1, выражаются током через последовательную цепь, состоящую из N конденсаторов, который в свою очередь равен току через каждый конденсатор. При этом ёмкость каждого конденсатора в цепи

C_i должна быть в N раз больше ёмкости всего элемента C_0 , а напряжение ВЧ сигнала на каждом конденсаторе будет в N раз меньше напряжения на всём элементе. При этом весь такой элемент управляется так же как один конденсатор с номиналом C_0 , управляемостью K при напряжении U_0 . Таким образом, для цепи из N конденсаторов можно записать в дБм

$$IP3[\text{дБм}] = IP3_1[\text{дБм}] + 20 \lg N \quad (4)$$

где N – число конденсаторов в цепи, а $IP3_1$ – величина $IP3$ для одного конденсатора с параметрами управляемости K и U_0 , и ёмкостью C_0 (по выражению (3)). То есть, например, цепь из 10 конденсаторов увеличивает величину $IP3$ на 20 дБ.

3. Экспериментальные результаты

Для реализации подхода, представленного выше, был изготовлен последовательно-параллельный сегнетоэлектрический планарный конденсатор с количеством конденсаторов в цепи $N = 11$ и резистивными цепями управления.

Сегнетоэлектрическая плёнка состава $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$ (BSTO) была нанесена на подложку сапфира (γ -срез) методом ВЧ магнетронного распыления при температуре подложки 800°C и давлении рабочего газа O_2 равного 2 Па. На плёнке BSTO методом фотолитографии и химического травления была сформирована активная область конденсатора. Затем методом ВЧ магнетронного распыления мишени PC-2005 (Si-76%; Ti-20%; Ce-4%) при температуре подложки 200°C и давлении рабочего газа Ar равного 0.2 Па была нанесена резистивная плёнка толщиной 20 нм, на которой также была сформирована топология резисторов развязки цепей управления. На следующем этапе методом термического испарения была нанесена металлическая плёнка Cu толщиной 1 мкм с адгезионным подслоем Cr толщиной 10 нм, на которой были сформированы обкладки, контактные площадки и межсоединения последовательно-параллельного конденсатора. В завершение рабочая область конденсатора была защищена плёнкой фоторезиста. Кроме того, в том же технологическом процессе были изготовлены простые планарные конденсаторы ($N = 1$) с равной шириной зазора и длиной зазора, соответствующей ёмкости равной ёмкости последовательно-параллельного конденсатора. Фотография изготовленного образца с $N = 11$ приведена на рисунке 2.

Измерение малосигнальных СВЧ характеристик производились на частоте 1.5 ГГц методом измерительного СВЧ резонатора [9]. Результаты приведены на рисунке 3. Видно, вольт-фарадная характеристика образцов с $N = 1$ и $N = 11$ близко соответствует, что позволяет экстраполировать интермодуляционные характеристики конденсатора с $N = 1$ на конденсатор с $N = 11$ согласно выражениям (3) и (4).

Для проведения измерений величины $IP3$ была собрана измерительная установка, блок-схема которой представлена на рисунке 4. Измеряемый образец устанавливался в измерительную ячейку, представляющую собой отрезок компланарной линии передачи с сопротивлением 50 Ом. Установка позволяла подать на образец двухтоновый СВЧ сигнал на частоте 2 ГГц с расстройкой 10 МГц и мощностью 39 дБм. Собственный $IP3$ измерительной установки достигал величины 95 дБм.

В таблице 1 приведены результаты исследований образцов конденсаторов с $N = 1$ (простой планарный конденсатор) и $N = 11$ (последовательно-параллельный конденсатор). Измеренные значения $IP3$ 87 дБм для $N = 11$ хорошо соответствуют оценке по выражениям (4) и (5) с учётом отличия в управляемости.

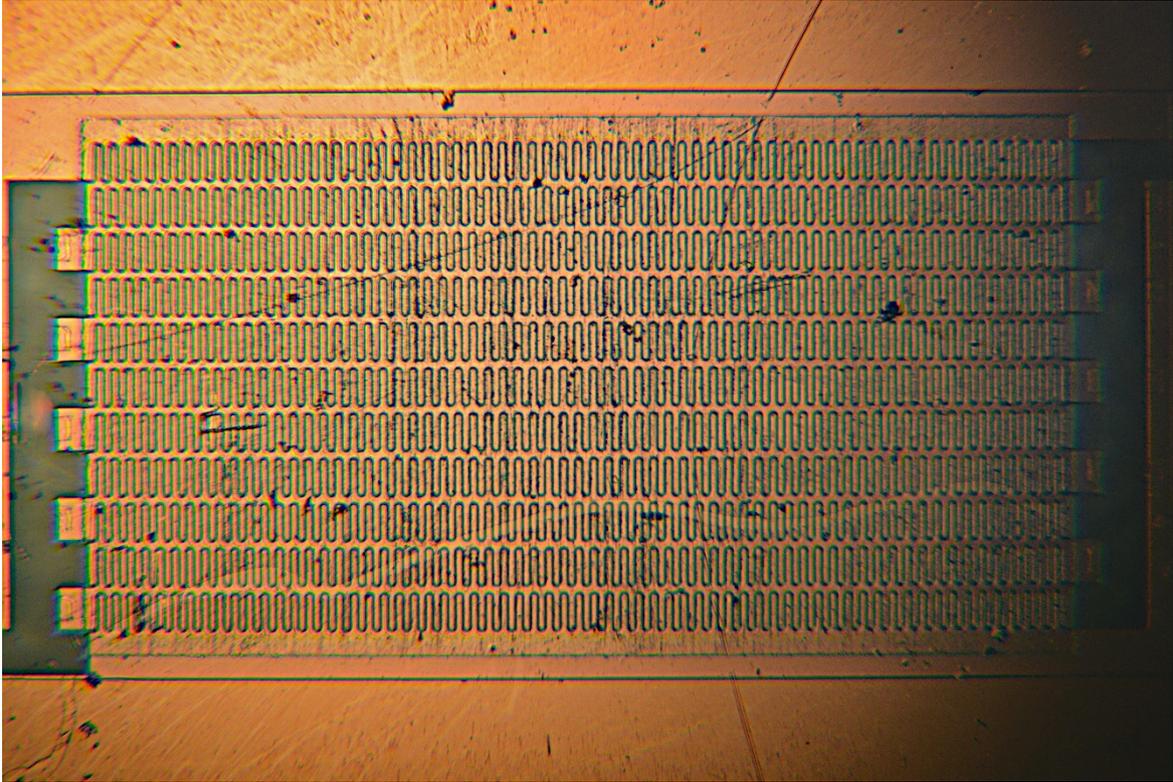


Рисунок 2. Общий вид изготовленного образца ($N = 11$).

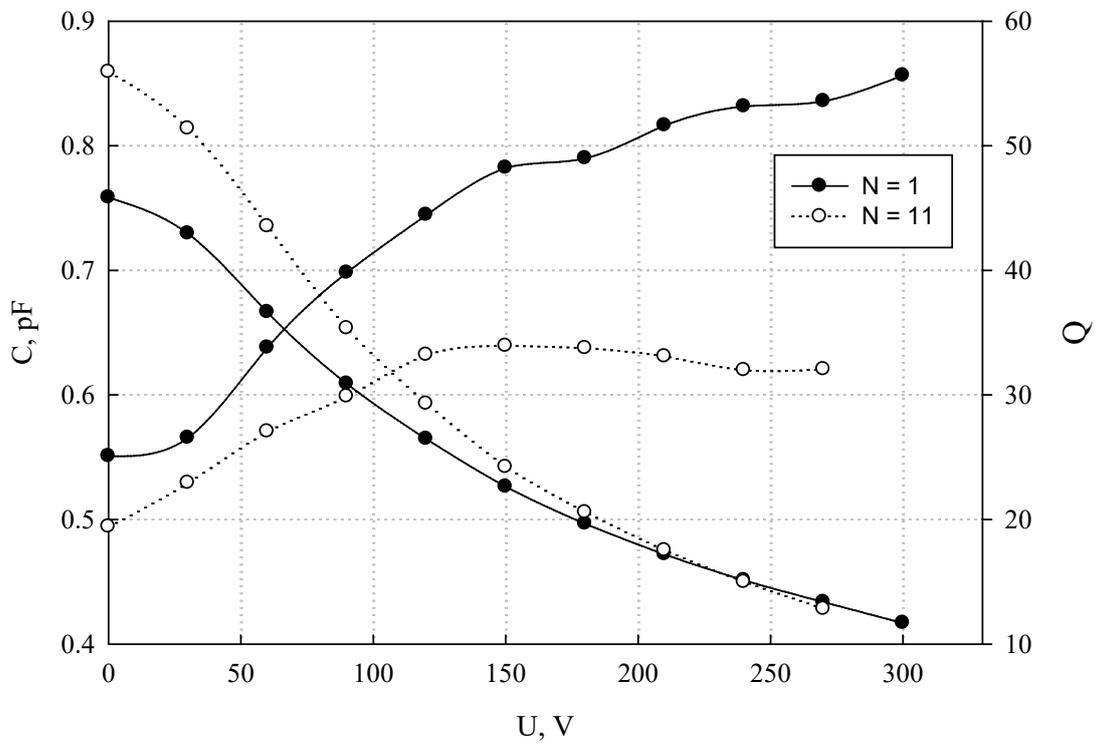


Рисунок 3. Вольт-фарадные характеристики образцов.

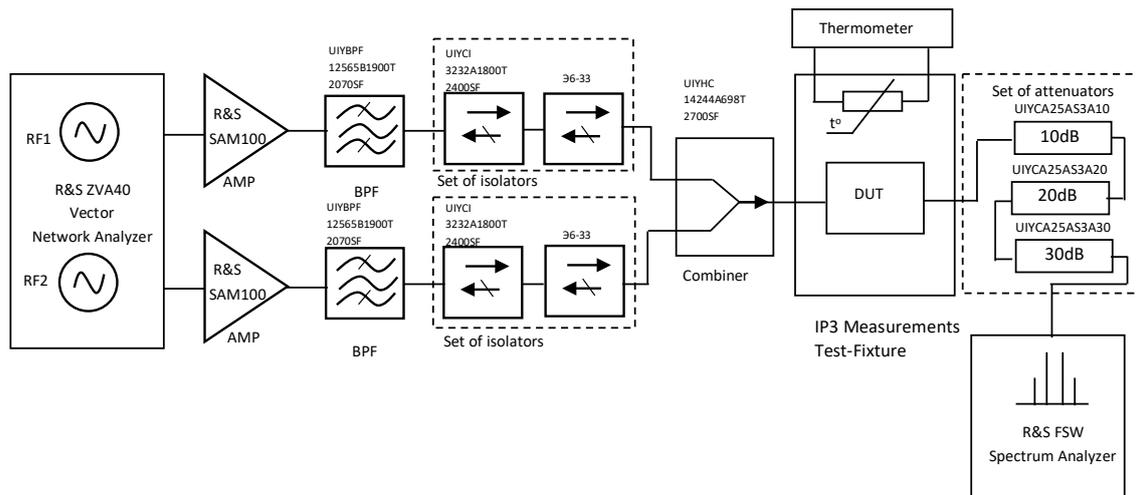


Рисунок 4. Блок-схема стенда для проведения измерений IP3.

Таблица 1. Результаты измерений СВЧ параметров сегнетоэлектрических конденсаторов

| N | C_0 , пФ | K | U_0 , В | IP3, дБм |
|-----|------------|-----|-----------|----------|
| 1 | 1,15 | 2,4 | 300 | 70 |
| 11 | 0,76 | 1,8 | 300 | 85 |

4. Заключение

Изготовленный и испытанный последовательно-параллельный сегнетоэлектрический конденсатор продемонстрировал величину IP3 равную 85 дБм, что соответствует предварительным оценкам, которые учитывают параметров управляемости (управляемости и напряжения, при котором она достигается) и количество конденсаторов в последовательной цепи.

Исследование выполнено при поддержке **Министерства науки и высшего образования РФ** в рамках гранта № 075-01438-22-07 - FSEE-2022-0015.

Список литературы

- Zelner M. et al. An Effective Passivation Film Stack for Thin Film BST Capacitors //Integrated Ferroelectrics. – 2008. – Т. 104. – №. 1. – С. 80-89.
- Zhao Z. et al. Ferroelectric phase shifters at 20 and 30 GHz //IEEE transactions on microwave theory and techniques. – 2007. – Т. 55. – №. 2. – С. 430-437.
- Вендик О. Г. Сегнетоэлектрики находят свою «нишу» среди управляющих устройств СВЧ //Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51. – №. 7. – С. 1441-1446.
- York R. A. Circuit configuration for DC-biased capacitors : пат. 6674321 США. – 2004.
- Yoon Y. K. et al. A reduced intermodulation distortion tunable ferroelectric capacitor-architecture and demonstration //IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 2003. – Т. 51. – №. 12. – С. 2568-2576.
- Солдатенков О. И. Сегнетоэлектрический СВЧ конденсатор : пат. 2529885 РФ. – 2013.
- Kozyrev A. B. et al. Nonlinear behavior of thin film SrTiO₃ capacitors at microwave frequencies //Journal of Applied Physics. – 1998. – Т. 84. – №. 6. – С. 3326-3332.
- Samoilova T. et al. Power handling capability of ferroelectric film varactors and tunable microwave devices //2006 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. – IEEE, 2006. – С. 1273-1276.
- Kozyrev A. B. et al. Procedure of microwave investigations of ferroelectric films and tunable microwave devices based on ferroelectric films //Microelectronic engineering. – 1995. – Т. 29. – №. 1-4. – С. 257-260.