

05;09

Обеспечение устойчивой работы сверхвысокочастотных сегнетоэлектрических устройств в широком температурном диапазоне

© С.П. Зубко, А.Х. Курбанов

С.-Петербургский государственный электротехнический университет
E-mail: SPZubko@mail.eltech.ru

Поступило в Редакцию 19 марта 2003 г.

Кратко рассмотрены несколько вариантов обеспечения устойчивой работы управляемых сегнетоэлектрических СВЧ устройств в широком интервале температур. Предложен способ электрической компенсации температурной зависимости характеристик сегнетоэлектрических устройств.

Одним из основных свойств сегнетоэлектриков является сильная зависимость их диэлектрических свойств от температуры. Вследствие этого при разработке сегнетоэлектрических управляющих устройств острой становится проблема обеспечения устойчивой работы устройства в широком температурном интервале. Так, к фазовращателям (ФВ), используемым в фазированных антенных решетках (ФАР) для радарных и антистолкновительных систем, устанавливаемых на движущемся транспорте, предъявляется требование осуществления устойчивого управления фазой сигнала в температурном диапазоне от -60 до $+60^{\circ}\text{C}$.

Возможны несколько подходов к обеспечению работы сегнетоэлектрических устройств в широком диапазоне температур.

Наиболее простым способом является термостатирование устройства путем его размещения в корпусе, в котором поддерживается постоянная температура, не зависящая от температуры окружающей среды.

Для термостатирования также возможно использование в конструкции перестраиваемого устройства позисторов [1] — терморезисторов, имеющих на температурной зависимости сопротивления участок поло-

жительного температурного коэффициента. Позисторы изготавливают на основе титана бария с микродобавками редкоземельных элементов. Отличительной чертой таких материалов является зависимость их сопротивления не только от температуры, но и от напряжения.

Общим недостатком этих способов термостатирования является большое время выхода системы на рабочий режим.

Следующий подход можно назвать технологическим. Он предполагает использование пленок сегнетоэлектрика $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (BST) с неоднородным распределением бария по толщине пленки. Такие пленки можно рассматривать как многослойные, т.е. состоящие из нескольких слоев сегнетоэлектрика с разными концентрациями бария x . В силу того что температура фазового перехода в BST зависит от концентрации бария, эти слои имеют разные температуры перехода в сегнетоэлектрическое состояние. Температурная зависимость суммарной, эффективной проницаемости такой слоистой пленки будет иметь практически плоский максимум в достаточно широком температурном интервале [2,3]. Однако в данном случае особенно важным является вопрос технологической воспроизводимости таких слоистых пленок.

Наиболее приемлемым, на наш взгляд, представляется способ электрической термокомпенсации — компенсации температурной зависимости диэлектрической проницаемости путем приложения к сегнетоэлектрику зависящего от температуры управляющего напряжения [4,5].

Электрическая компенсация температурной зависимости емкости сегнетоэлектрического конденсатора

1. Модельное представление зависимости напряжения от температуры. Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков типа смещения (BST) зависит от температуры следующим образом [6,7]:

$$\varepsilon_f(E, T, x) = \varepsilon_{00}(x)/\Phi(E, T, x), \quad (1)$$

$$\Phi(E, T, x) = \left[(\xi(E, x)^2 + \eta(T, x)^3)^{1/2} + \xi(E, x) \right]^{2/3} + \left[(\xi(E, x)^2 + \eta(T, x)^3)^{1/2} - \xi(E, x) \right]^{2/3} - \eta(T, x), \quad (2)$$

$$\xi(E, x) = \sqrt{\left(\frac{E}{E_N(x)}\right)^2 + \left(\frac{\xi_s E_N(0)}{E_N(x)}\right)^2}, \quad \eta(T, x) = \frac{T}{T_C(x)} - 1, \quad (3)$$

где ξ_s — параметр, характеризующий кристаллографическое качество сегнетоэлектрика, E_N — нормирующее поле (параметр, характеризующий нелинейность материала), $\varepsilon_{00} = C_w/T_C$, C_w — постоянная Кюри–Вейса, T_C — температура Кюри. Зависимость параметров модели от концентрации x подробно рассмотрена в работах [7,8].

Приравняв правую часть выражения (1) к некоторой требуемой для работы устройства величине проницаемости ε_g , выведем температурную зависимость напряженности управляющего поля:

$$E(T, \varepsilon_g) = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{00}(x)}{\varepsilon_g} - \eta(T, x)\right) \left(\frac{\varepsilon_{00}(x)}{2\varepsilon_g} + \eta(T, x)\right)^2 E_N^2(x) - \xi_s^2 E_N^2(0)}. \quad (4)$$

Используя методы частных емкостей и конформных отображений, можно пересчитать диэлектрическую проницаемость сегнетоэлектрика в емкость планарного конденсатора [9] (рис. 1, а):

$$C(U, T, x) = w\varepsilon_0 \left[\frac{\varepsilon_f(U, T, x) - \varepsilon_s - 1}{s/h + 4 \ln(2)/\pi} + \frac{2}{\pi} \ln\left(4 \frac{L}{s}\right) + (\varepsilon_s - 1) \frac{1}{\pi} \ln\left(\frac{16H}{\pi s}\right) \right], \quad (5)$$

где s — ширина зазора планарного конденсатора, h — толщина сегнетоэлектрической пленки, L — длина электродов, H — толщина подложки, w — ширина конденсатора [9], ε_s — диэлектрическая проницаемость подложки.

Напряженность управляющего поля и напряжение в планарном конденсаторе связаны следующим образом [10]:

$$U(T, C_g) = E(T, C_g) \cdot (s + h). \quad (6)$$

В формуле (6), в отличие от выражения (4), напряженность поля смещения записана как функция температуры и заданной емкости C_g , так как значение заданной проницаемости определяется исходя из значения требуемой для работы устройства емкости с использованием выражения (5), связывающего значения емкости и проницаемости планарного

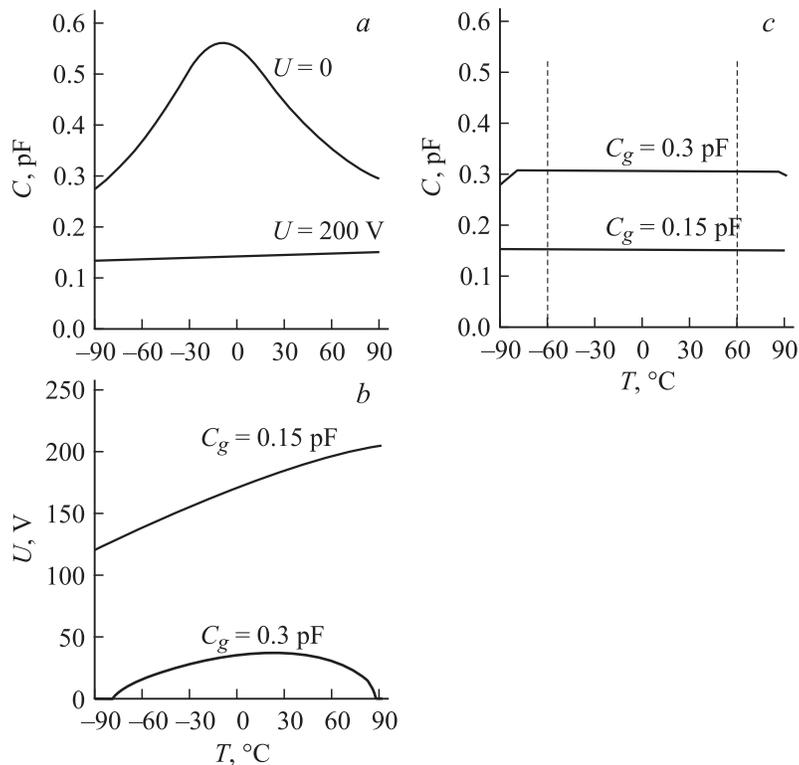


Рис. 1. Температурная зависимость емкости планарного конденсатора: *a* — включающего пленку $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ при разных значениях управляющего напряжения и $\xi_s = 0.6$; *b* — к которому приложено зависящее от температуры управляющее напряжение для разных заданных значений емкости; *c* — к сегнетоэлектрическому конденсатору приложено напряжение в соответствии с выражениями (4)–(6).

конденсатора, включающего в себя подложку с сегнетоэлектрической пленкой. Вид зависимости $U(T, C_g)$, приведен на рис. 1, *b*.

Как видно из рис. 1, *c*, приложение к сегнетоэлектрическому конденсатору зависящего от температуры напряжения в соответствии с (4)–(6) позволяет получить емкость, не зависящую от температуры в довольно широком температурном интервале.

2. Электрическая термокомпенсация. Для осуществления электрической термокомпенсации напряжение смещения на перестраиваемый сегнетоэлектрический конденсатор должно поступать через блок коррекции.

Коррекцию напряжения смещения при изменении параметров сегнетоэлектрического конденсатора от температуры в соответствии с внешними факторами можно выполнять аналогово или дискретно. Блок-схема модуля дискретной коррекции напряжения показана на рис. 2, где PS — управляемый источник напряжения смещения, $\Lambda_U/\#$, $\Lambda_T/\#$ — аналогоцифровые преобразователи (АЦП) напряжения и температуры соответственно, SW_U , SW_T — дешифратор напряжения и температуры соответственно, $\#/\Lambda$ — цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), CM — модуль сравнения, C_f — сегнетоэлектрический конденсатор, TS — термодатчик.

В таком модуле управления коррекция текущего напряжения осуществляется путем его умножения на коэффициент коррекции $K_{U,T}$ (КК), исходя из требуемого значения управляющего напряжения и температуры. Коэффициенты $K_{U,T}$ определяются по формуле (6) и представляются дискретным набором в виде матрицы (рис. 2):

$$K_{U,T} = \frac{U(T, C_g)}{U_c}, \quad (6)$$

где $U_c = U(T_0, C_g)$ при $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

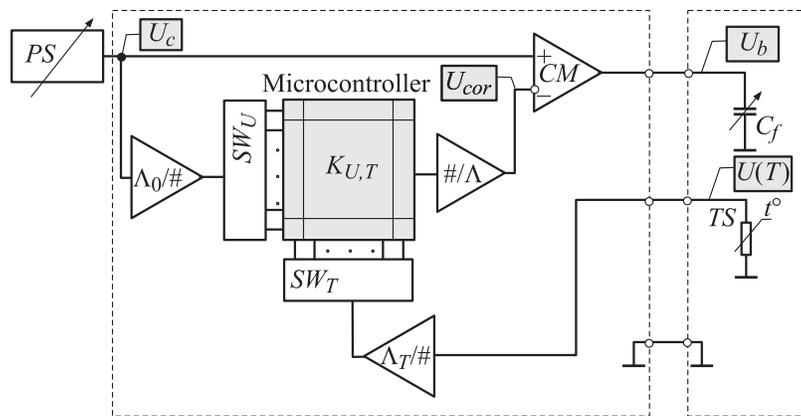


Рис. 2. Блок-схема модуля коррекции напряжения (CVM) смещения.

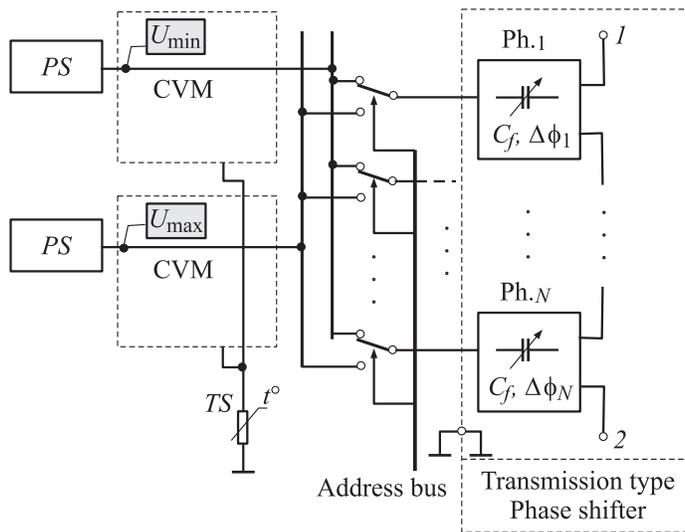


Рис. 3. Блок-схема подачи скорректированного напряжения смещения на дискретные фазовращатели (Ph_1, Ph_N): 1 — вход, 2 — выход.

С помощью двух АЦП происходит выборка текущего значения напряжения U_c и температуры $U(T)$. Показания текущей температуры обеспечивает внешний термодатчик, расположенный в одном корпусе с управляемым элементом. Эти сигналы с помощью дешифраторов производят выборку строки и столбца, где расположен соответствующий КК, на который необходимо умножить текущее значение U_c для данной температуры. КК преобразуется с помощью ЦАП в аналоговое значение U_{cor} и поступает на модуль сравнения (СМ), где происходит сравнение двух напряжений: U_c и U_{cor} . На выходе МС образуется требуемое напряжение U_b , которое и поступает на управляемый элемент.

Реакция на изменение температуры этой схемы коррекции напряжения смещения составляет порядка $10 \mu s$.

Достоинством метода является гибкое переконфигурирование, выполняемое путем замены табличных КК. К недостаткам относится дискретный по температуре диапазон работы устройства, ограниченный разрядностью ЦАП и АЦП, который ведет к разбивке рабочего температурного диапазона на рабочие поддиапазоны. Если для каждого разряда

ФВ применять одинаковые емкости, то количество модулей коррекции напряжения можно сократить до двух. В этом случае термодатчик ставится один на два модуля коррекции напряжения, которые управляют сегнетоэлектрическими конденсаторами. Схема такой коммутации показана на рис. 3, где SVM — модуль коррекции напряжения, описанный выше (рис. 2). В этом случае быстродействие устройства будет определяться быстродействием ключей, коммутирующих скомпенсированное по температуре напряжение смещения.

При большой площади ФАР в случае неравномерного распределения температуры по площади, необходимо ставить несколько таких SVM и термодатчиков на каждый регион с одинаковыми температурами.

Авторы выражают искреннюю благодарность О.Г. Вендику и И.Б. Вендик за плодотворные дискуссии.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (шифр гранта PD02-2.7-130), а также Министерства промышленности, науки и технологии РФ (договор № 239 СП/МЛП-10 в рамках госконтракта № 40.012.1.11.46 от 01.02.02).

Список литературы

- [1] *Полупроводники на основе титана бария* / Под ред. В.М. Петрова. М.: Энергоиздат, 1981. 327 с.
- [2] *Vendik O.G., Zubko S.P., Karmanenko S.F. et al. // J. Appl. Phys.* 2002. V. 91. N 1. P. 331–335.
- [3] *Гольман Е.К., Гольдрин В.И., Логинов В.Е. и др. // Письма в ЖТФ.* 1999. Т. 25. В. 14. С. 1–5.
- [4] *Прудан А.М.* Многослойные структуры на эффекте сильного поля в сегнетоэлектрических пленках. Дисс. ... докт. техн. наук. С.-Петербург, С.-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, 2002.
- [5] *Prudan A., Kozыrev A., Zemtsov A. et al.* 15th International Symposium on Integrated Ferroelectrics (ISIF 2001), 9.03–12.03.2003, Colorado Springs, USA.
- [6] *Vendik O.G., Zubko S.P. // J. Appl. Phys.* 1997. V. 82. N 9. P. 4475–4483.
- [7] *Vendik O.G., Zubko S.P., Nikol'ski M.A. // J. Appl. Phys.* 2002. V. 92. N 12. P. 7448–7452.
- [8] *Vendik O.G., Nikol'ski M.A., Zubko S.P. // J. Appl. Phys.* 2003 (submitted for publication).
- [9] *Вендик О.Г., Зубко С.П., Никольский М.А. // ЖТФ.* 1999. Т. 69. В. 4. С. 1–7.
- [10] *Вендик О.Г., Никольский М.А. // Письма в ЖТФ.* 2003. Т. 29. В. 5. С. 20–29.