

Медведева В.В.¹, Самойлова Т.Б.¹, Михайлов А.К.^{1,2}, Козырев А.Б.¹

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический

университет «ЛЭТИ»

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет

информационных технологий, механики и оптики

Утроитель частоты СВЧ диапазона на основе сегнетоэлектрических пленок

Проведен аналитический анализ утроителя частоты на СЭ варакторе, основанный на описании экспериментальной зависимости дифференциальной емкости варактора от напряжения ограниченным полиномом второй степени. Получены выражения для эффективности преобразования умножителя и частоты отсечки. Результаты аналитического анализа потенциальных возможностей утроителя частоты подтверждены результатами компьютерного моделирования характеристик схемы утроителя.

Ключевые слова: умножитель частоты, утроитель частоты, сегнетоэлектрический варактор

Основное направления использования СЭ пленок в диапазоне СВЧ – управляемые устройства: фильтры, фазовращатели, линии задержки [1]. В нелинейных устройствах, таких как преобразователи частоты (смесители, умножители, генераторы гармоник), сегнетоэлектрики до сих пор не нашли применения. Только в нескольких статьях [2, 3] сотрудников Чалмерского университета (Швеция) затрагивался вопрос о СЭ варакторах, как о возможной альтернативе гетероструктурным барьерным варакторам в умножителях частоты. В настоящей работе исследуется принципиальная возможность использования СЭ варактора как нелинейного элемента утроителя частоты.

СЭ варакторы для умножителей могут иметь как плоскопараллельную ("сэндвич") структуру, так и планарную (Рис.1).

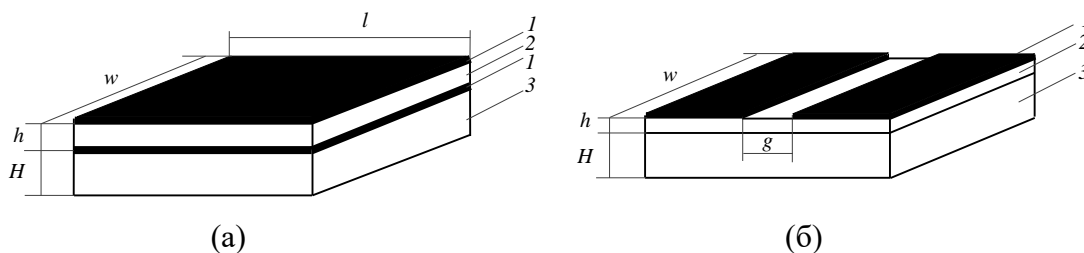


Рис. 1. Плоскопараллельный (а) и планарный (б) конденсаторы.

1 – электроды, 2 – СЭ пленка, 3 - подложка

Нелинейность емкости СЭ конденсатора обусловлена фундаментальным свойством сегнетоэлектриков: зависимостью диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля, $\epsilon(E)$. В области слабых полей из разложения свободной энергии СЭ по степеням индуцированной электрическим полем поляризации P следует:

$$\varepsilon_0 \varepsilon(E) = \varepsilon_0 \varepsilon(0) \left[1 + 3\beta (\varepsilon_0 \varepsilon(0))^3 E^2 \right], \quad (1)$$

где для BaTiO_3 $\beta = -8.6 \cdot 10^8 \text{ В} \cdot \text{м}^5 / \text{Кл}^3$ – коэффициент нелинейности в статическом поле [4].

Из (1) следует зависимость емкости от постоянного напряжения U_{dc} на электродах конденсатора $C(U_{dc}) = \frac{Q(U_{dc})}{U_{dc}}$ (Q – заряд на электродах):

$$\frac{C(U_{dc})}{C_0} = 1 + 3\beta \frac{(\varepsilon_0 \varepsilon(0))^3}{a^2} U_{dc}^2 = 1 + \frac{C_2}{C_0} U_{dc}^2, \quad (2)$$

где C_0 – емкость при $U_{dc} = 0$, $\frac{C_2}{C_0} = -3\beta \frac{(\varepsilon_0 \varepsilon(0))^3}{a^2}$, C_2 – коэффициент статической нелинейности, $a = h$ для "сэндвич"-конденсатора и $a = g$ для планарного конденсатора (см. Рис. 1). Как следует из (2), крутизна вольт-фарадной характеристики (ВФХ) СЭ варактора может варьироваться как путем изменения конструкции, так и технологически за счет изменения ε СЭ пленки.

Нелинейный отклик СЭ конденсатора на сигнал СВЧ обусловлен зависимостью емкости от мгновенных значений СВЧ напряжения на его обкладках. Благодаря отсутствию дисперсии ε вплоть до частот порядка 10^{11} Гц [4], можно считать, что емкость СЭ конденсатора безынерционно следует за напряжением СВЧ, и потому базой для анализа умножителя частоты является малосигнальная зависимость дифференциальной емкости $C_d = \frac{dQ}{dU}$ от постоянного U_{dc} , которая теоретически отличается от (2) значением коэффициента C_2 . В дальнейшем индекс "d" опущен.

На Рис. 2 приведены примеры экспериментальных ВФХ $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$ -конденсаторов с одинаковым значением начальной емкости $C_0 = 0.3 \text{ пФ}$; сплошные кривые – экспериментальные данные, пунктир – аппроксимация.

Низкие значения ε для тонких СЭ пленок в составе "сэндвич" структур обусловлены как размерным эффектом [6], так и наличием последовательно включенных приэлектродных слоев с низкой диэлектрической проницаемостью [7].

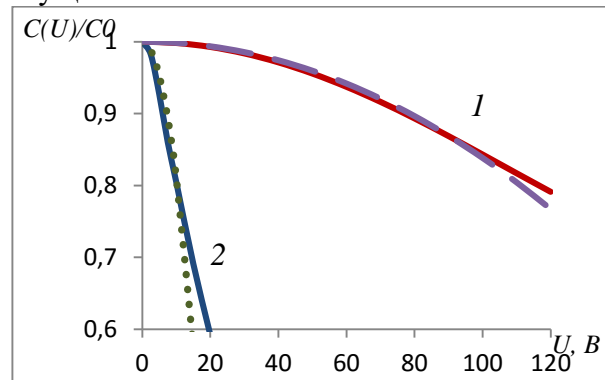


Рис. 2. Вольт-фарадные характеристики $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ -конденсаторов планарной (1) и "сэндвич" (2) структур. Параметры структур: (1) – $\varepsilon \approx 10^3$, $h = 0.5 \text{ мкм}$, $g = 17 \text{ мкм}$, $w = 1 \text{ мм}$; (2) – $\varepsilon \approx 230$, $h = 400 \text{ нм}$, $w \times l = 8 \times 8 \text{ мкм}$.

Анализ утроителя частоты сводится к:

– анализу эффективности умножения частоты СЭ варактором, $\eta = \frac{P_3}{P_1}$, где P_1 – мощность сигнала СВЧ на частоте f_0 , подводимая к СЭ варактору, P_3 – мощность, генерируемая СЭ варактором на утроенной частоте $3f_0$;

– определению импеданса СЭ варактора на частотах f_0 и $3f_0$.

Используя подход, предложенный в [8] для анализа удвоителя на КМОП-варакторе, аналитически выведем выражения для параметров утроителя частоты (η и частоты отсечки f_c) для случая слабой нелинейности, ограничиваясь при описании ВФХ квадратичным по напряжению членом степенного ряда, $C(U) = C_0 + C_2 U^2$, что дает, по крайней мере, начальные оценки параметров утроителя.

Эффективность утроителя частоты

Рассмотрим сначала СЭ варактор без потерь. В установившемся процессе в утроителе

частоты к СЭ варактору приложены напряжения на основной (f_0) и утроенной ($3f_0$) частотах:

$$u(t) = U_1 \cos(\omega t) + U_3 \cos(3\omega t + \theta), \quad \text{где } \omega = 2\pi f_0$$

Ток через варактор под действием переменного напряжения

$$i(t) = \frac{dq(u)}{du} \cdot \frac{du(t)}{dt} = C(u(t)) \frac{du(t)}{dt} = i_{f_0}(t) + i_{3f_0}(t), \quad \text{где}$$

$$i_{f_0} = -\omega C_0 U_1 \sin(\omega t) - \frac{1}{2} \omega C_2 \left(\frac{1}{2} U_1^3 + U_1 U_3^2 \right) \sin(\omega t) - \frac{1}{4} \omega C_2 U_1^2 U_3 \sin(\omega t + \theta)$$

$$i_{3f_0} = -3\omega C_0 U_3 \sin(3\omega t + \theta) - \frac{3}{2} \omega C_2 \left(U_1^2 U_3 + \frac{1}{2} U_3^3 \right) \sin(3\omega t + \theta) - \frac{1}{4} \omega C_2 U_1^3 \sin(3\omega t)$$

Для мощности, поступающей в конденсатор за период на частоте f_0 , (P_{T,f_0}) и генерируемой конденсатором на частоте $3f_0$, ($P_{T,3f_0}$), справедливы выражения:

$$P_{T,f_0} = \frac{1}{T_{f_0}} \int_0^{T_{f_0}} U_1 \cos(\omega t) i_{f_0}(t) dt = \frac{1}{8} \omega C_2 U_1^3 U_3 \sin(-\theta) \quad (3)$$

$$P_{T,3f_0} = \frac{1}{T_{3f_0}} \int_0^{T_{3f_0}} U_3 \cos(3\omega t + \theta) i_{3f_0}(t) dt = -\frac{1}{8} \omega C_2 U_1^3 U_3 \sin(-\theta) \quad (4)$$

Из выражений (3) и (4) следует равенство абсолютных значений мощностей P_{T,f_0} и $P_{T,3f_0}$ ($P_{T,f_0} = -P_{T,3f_0} = P_T$), что соответствует соотношению Мэнли-Роу [9]. P_T и есть мощность, которая преобразуется с частоты f_0 на $3f_0$.

С учетом мощности потерь в СЭ варакторе на частотах f_0 и $3f_0$ (соответственно, $P_{R_s,f_0} = \frac{1}{2} |i_{f_0}|^2 R_{s,f_0}$ и $P_{R_s,3f_0} = \frac{1}{2} |i_{3f_0}|^2 R_{s,3f_0}$, где R_s – сопротивление потерь варактора)

выражение для эффективности преобразования, $\eta = \frac{P_3}{P_1} = \frac{P_T - P_{R_s,3f_0}}{P_T + P_{R_s,f_0}}$, принимает вид:

$$\eta(\theta, U_3) = \frac{1 - \frac{1}{Q_3 \sin(-\theta)} \cdot 12 \frac{C_0 U_3}{C_2 U_1^3} \left[1 + \frac{C_2}{C_0} \left(U_1^2 + \frac{1}{2} U_3^2 \right) + \frac{1}{4} \frac{C_2^2}{C_0^2} \left(U_1^2 + \frac{1}{2} U_3^2 \right)^2 + \frac{1}{16 \cdot 9} \frac{C_2^2 U_1^6}{C_0^2 U_3^2} + \frac{1}{6} \frac{C_2 U_1^3}{C_0 U_3} \left[1 + \frac{1}{2} \frac{C_2}{C_0} \left(U_1^2 + \frac{1}{2} U_3^2 \right) \right] \cdot \cos \theta \right]}{1 + \frac{1}{Q_1 \sin(-\theta)} \cdot 4 \frac{C_0}{C_2} \frac{1}{U_1 U_3} \left[1 + \frac{C_2}{C_0} \left(U_1^2 + \frac{1}{2} U_3^2 \right) + \frac{1}{4} \frac{C_2^2}{C_0^2} \left(U_1^2 + \frac{1}{2} U_3^2 \right)^2 + \frac{1}{16} \frac{C_2^2}{C_0^2} U_1^2 U_3^2 + \frac{1}{2} \frac{C_2}{C_0} U_1 U_3 \left[1 + \frac{1}{2} \frac{C_2}{C_0} \left(U_1^2 + \frac{1}{2} U_3^2 \right) \right] \cdot \cos \theta \right]} \quad (5)$$

где $Q_1 = \frac{1}{\omega C_0 R_{s,f_0}}$, $Q_3 = \frac{1}{3\omega C_0 R_{s,3f_0}}$ – добротности СЭ варактора на частотах f_0 и $3f_0$, соответственно. Для конкретного варактора, используемого в умножителе, эффективность преобразования следует оптимизировать, варьируя значения амплитуды третьей гармоники U_3 и угла θ .

Рис. 3 иллюстрирует зависимость эффективности преобразования от U_3 и θ на варакторах, ВФХ которых приведены на Рис. 2, при $U_1 = 10\text{В}$ и $U_1 = 100\text{В}$, соответственно на "сэндвич" (Рис. 3а) и планарном (Рис. 3б) варакторах. Значения добротностей были выбраны, исходя из работы [2] для "сэндвич"-варактора с Pt-электродом: $Q_1 = 50$ для $f_0 = 10$ ГГц и $Q_3 = 17$ для $3f_0 = 30$ ГГц. Из Рис. 3 следует, что для "сэндвич"-конденсатора $U_3 = 1.5$ В, $\theta = 85^\circ$, $\eta = \eta_{max} = 15.6\%$, а для планарного – $U_3 = 15$ В, $\theta = 85^\circ$, $\eta_{max} = 14.6\%$ при тех же значениях Q_1 и Q_3 . (Отметим, что для планарного варактора добротности могут быть выше, чем для "сэндвич".)

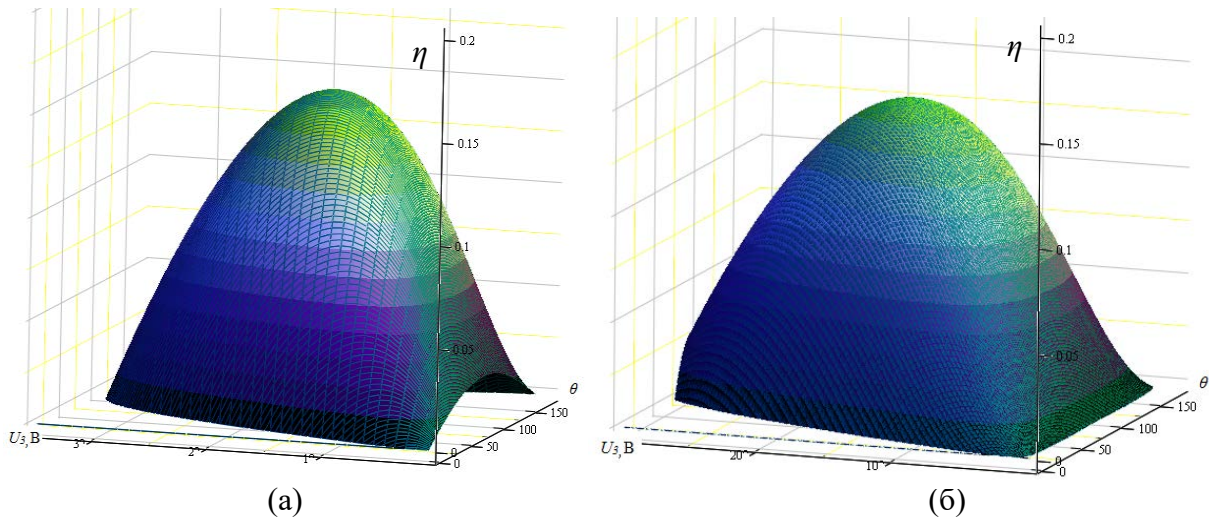


Рис. 3. Рассчитанная из выражения (5) зависимость эффективности преобразования от амплитуды третьей гармоники U_3 и угла θ для "сэндвич" (а) и планарного (б) конденсаторов

Важным параметром, характеризующим качество варакторов, является динамическая частота отсечки f_c , которая учитывает не только потери, но и нелинейность:

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_s} \left(\frac{1}{C_{min}} - \frac{1}{C_{max}} \right) \quad (6)$$

Чем выше f_c , тем выше качество варактора: при приближении входной частоты f_0 к частоте отсечки η снижается за счет ослабления нелинейности (уменьшения $\frac{C_{max}}{C_{min}}$), поэтому важно связать η и f_c аналитически, чтобы оценить перспективы конкретного варактора для умножения частоты. Связь η и f_c зависит от вида нелинейности. В частности, для СЭ конденсаторов, для описания ВФХ которых используются два члена степенного ряда, из (6) следует связь добротности и f_0/f_c вида:

$$Q_1 = \frac{f_c}{f_0} \cdot \frac{1 + \frac{C_2 U_1^2}{C_0}}{-\frac{C_2 U_1^2}{C_0}} \quad (7)$$

При известном отношении добротностей СЭ варактора на частотах f_0 и $3f_0$, зависимость эффективности преобразования η от отношения частот f_0/f_c следует из выражений (5) и (7). Действительно, приравняв к нулю производную $\frac{d\eta}{dU_3}$, можно найти связь между f_0/f_c и U_3 , и, как результат, получить зависимость $\eta(f_0/f_c)$.

Рис. 4 иллюстрирует зависимость оптимальной эффективности преобразования η от отношения частот f_0/f_c при $Q_3 = Q_1/3$.

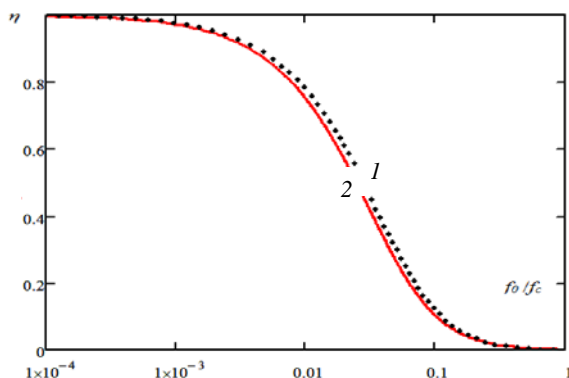


Рис. 4. Зависимость эффективности преобразования от отношения частот f_0/f_c для $Q_3=Q_1/3$ для "сэндвич" (1) и планарного (2) конденсаторов

Видно, что для рассматриваемых конденсаторов коэффициент преобразования $>20\%$ возможен при отношении частот $f_0/f_c < 0.07$. Увеличение добротности пропорционально увеличивает f_c , тем самым увеличивает коэффициент преобразования для заданной частоты f_0 , и расширяет частотный диапазон утроителя.

Подчеркнем, что эти оценки относятся к потенциальным возможностям только нелинейной емкости и не учитывают потери в других элементах схемы умножителя.

Для подтверждения результатов аналитического анализа утроителя частоты (3×10 ГГц) на СЭ варакторах мы провели компьютерное моделирование схемы утроителя на "сэндвич"-конденсаторе, рассчитав импедансы СЭ конденсатора на частотах f_0 и $3f_0$, импедансы генератора и нагрузки и параметры элементов входного и выходного фильтров. Результаты моделирования дали хорошее совпадение значения эффективности преобразования (в пределах 1,5%) с данными аналитического анализа утроителя, приведенного выше.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-10049).

Библиографический список

1. О.Г. Вендик Сегнетоэлектрики находят свою «нишу» среди управляющих устройств СВЧ // Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51, вып. 7. – С. 1441-1445.
2. A. Vorobiev, P. Rundqvist, K. Khamchane, S. Gevorgian Silicon substrate integrated high Q-factor parallel-plate ferroelectric varactors for microwave/millimeterwave applications // Applied Physics Letters 83, 3144 (2003) pp. 3144-3146.
3. P. Rundqvist, A. Vorobiev, S. Gevorgian, E. Kollberg Analysis of multiplier with a novel symmetric ferroelectric varactor // 16th International Symposium on Space Terahertz Technology, pp. 311-314.
4. Y.L. Wang, A.K. Tagantsev, D. Damjanovic, N. Setter, V.K. Yarmarkin, A.I. Sokolov, I.A. Lukyanchuk Landau thermodynamic potential for BaTiO₃ // Journal of Applied Physics 101, 104115 (2007)
5. J. Han, F. Wan, Z. Zhu, W. Zhang Dielectric response of soft mode in ferroelectric SrTiO₃ // Applied Physics Letters 90, 031104, 2007.
6. О.Г. Вендик, С.П. Зубко, Л.Т. Тер-Мартirosян Корреляционные эффекты в сегнетоэлектрическом тонкопленочном конденсаторе ФТТ 1996, Т.38, вып.2, с.3654-3664.
7. Cheol Seong Hwang, Byoung Taek Lee, et. al Depletion layer thickness and Schottky type carrier injection at the interface between Pt electrodes and (Ba, Sr)TiO₃ thin films // Journal of applied physics, V. 85, No. 1, 1999, pp. 287-295.
8. Ruonan Han, Ehsan Afshari A high-power broadband passive terahertz frequency doubler in CMOS // IEEE transactions on microwave theory and techniques, Vol. 61, No. 3, march 2013,– pp. 1150-1160.
9. L.M. Manley, H.E. Rowe Some general properties of nonlinear element. Part 1 General energy relations. Proc. IRE 1956, V. 44, №7, pp. 904-913.