

05;06;09

Влияние тепловых эффектов на нелинейность планарных конденсаторов на основе пленок титаната стронция на сапфире в поле СВЧ

© Т.Б. Самойлова, К.Ф. Астафьев

Санкт-Петербургский электротехнический университет,
197376 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 26 мая 1999 г.)

Нелинейное поведение планарных конденсаторов на основе тонких пленок титаната стронция на СВЧ исследовано путем измерения мощности сигнала комбинационной частоты третьего порядка, генерируемого конденсатором при воздействии бигармонического сигнала СВЧ. Измерения проводились при температурах 78 и 300 К на частоте 4 GHz. При $T = 300$ К нелинейный отклик конденсатора соответствовал нелинейности, определяемой из малосигнальной вальт-фарадной характеристики. При $T = 78$ К наблюдалось значительное усиление нелинейного отклика на бигармонический сигнал СВЧ при близких частотах и равных амплитудах его составляющих. Показано, что этот эффект связан с модуляцией температуры пленки титаната стронция с частотой биений за счет малой величины ($\sim 10^{-8}$ с) тепловой постоянной времени для пленки SrTiO₃ на сапфировой подложке. Получено аналитическое выражение для генерируемой SrTiO₃ конденсатором мощности сигнала комбинационной частоты третьего порядка, учитывающее вклад теплового эффекта в нелинейность конденсатора.

Введение

Использование нелинейности диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрических материалов в технике СВЧ известно давно [1,2]. В настоящее время успехи технологии получения тонких пленок кислородосодержащих сегнетоэлектриков (SrTiO₃, Ba_xSr_{1-x}TiO₃), проявляющих сильную нелинейность диэлектрической проницаемости ϵ при относительно низких диэлектрических потерях ($\text{tg } \delta \sim 10^{-2}$) в параэлектрической фазе, привели к возобновлению интереса к этим пленкам для создания как пассивных (фазовращатели, перестраиваемые фильтры [3,4]), так и активных (преобразователи частоты [4,5]) устройств СВЧ.

Открытие в 1987 г. высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) в металл-оксидных материалах стимулировало повышенный интерес к низкотемпературному параэлектрику титанату стронция. Структурная и химическая совместимость сверхпроводящих оксидов (в частности, YBa₂Cu₃O₇) и SrTiO₃ обеспечивает высокое качество границы раздела между ВТСП электродом и пленкой титаната стронция, снижая потери в конденсаторе, и, кроме того, открывают возможности реализации криогенных СВЧ интегральных схем, использующих уникальные особенности нелинейных диэлектриков и сверхпроводимости [6]. Однако возможности практического использования нелинейных конденсаторов в линейных устройствах СВЧ могут быть ограничены проявлением нежелательных для этих устройств нелинейных эффектов (генерация гармоник и паразитных сигналов комбинационных частот).

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования и моделирования нелинейного отклика планарных конденсаторов на основе пленок

титаната стронция (СТО-конденсаторов) на СВЧ сигнал повышенного уровня. Экспериментально измерялся коэффициент передачи резонатора с включенным в него СТО-конденсатором при различных уровнях падающего СВЧ сигнала, а также мощность сигнала комбинационной частоты третьего порядка, генерируемого конденсатором при бигармоническом СВЧ воздействии. Эксперименты проводились при температуре $T = 78$ и 300 К.

Описание образцов. Малосигнальные характеристики

Объектом наших исследований были нелинейные планарные конденсаторы (рис. 1) на основе тонких пленок титаната стронция толщиной $h = 1 \mu\text{m}$, осажженных на сапфировую подложку толщиной $H = 0.3 \text{ mm}$ методом высокочастотного магнетронного распыления [7]. Пленка меди толщиной $8 \mu\text{m}$, нанесенная на пленку титаната стронция, служила электродами конденсатора. Основные размеры емкостной структуры: ширина и длина емкостного зазора соответственно $s = 4-6 \mu\text{m}$ и $W = 0.6 \text{ mm}$, габаритные размеры конденсатора $0.5 \times 0.3 \times 1.5 \text{ mm}$. Измерения малосигнальных СВЧ параметров проводились на частоте $\sim 4 \text{ GHz}$ резонансным методом с использованием измерителя комплексных коэффициентов передачи P4-38. Измерительный микрополосковый резонатор, общий вид которого показан на рис. 1, представлял собой отрезок длиной l медной микрополосковой линии с волновым сопротивлением $Z_S = 21 \Omega$, разомкнутый на одном конце и короткозамкнутый на другом. Исследуемый конденсатор включался в разрыв проводника резонатора вблизи короткозамкнутого конца. Резонатор связан с внешними цепями через емкостной зазор связи, который

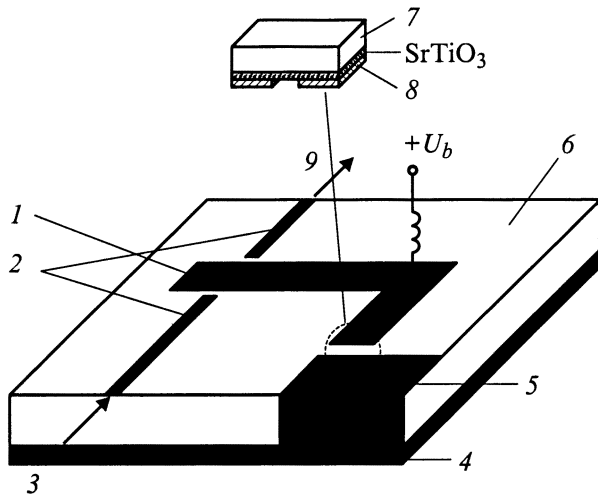


Рис. 1. Общий вид измерительного микрополоскового резонатора: 1 — микрополосковый резонатор, 2 — подводящие линии, 3 — вход СВЧ, 4 — земляной проводник; 5 — заземленная площадка, 6 — подложка (поликор), 7 — сапфир, 8 — электроды (Cu), 9 — выход СВЧ. На вставке показан исследуемый планарный конденсатор.

обеспечивал коэффициент передачи -9 dB при использовании линейного конденсатора с малыми ($\text{tg } \delta < 10^{-3}$) потерями при собственной добротности $Q_{00} = 200$. В зависимости от емкости и потерь исследуемых конденсаторов коэффициент передачи S_{21} , резонансная частота f_0 и собственная добротность Q_0 резонатора варьировались в следующих пределах: $-13 \dots -24$ dB для S_{21} ; $60 \dots 100$ для Q_0 ; $3.5 \dots 4.2$ GHz для f_0 .

На рис. 2 показано изменение резонансных кривых измерительного резонатора при приложении к исследуемому конденсатору постоянного напряжения смещения U_b . Из анализа резонансных кривых для STO-конденсатора получены малосигнальная емкость $C_0 = -\text{tg}(\beta l)(\omega_0 Z_S)^{-1}$, тангенс угла диэлектрических

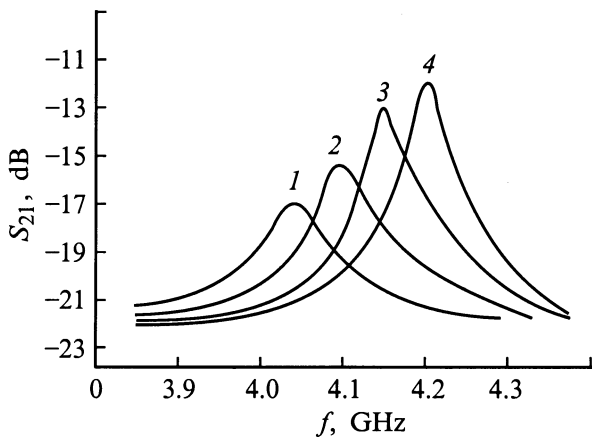


Рис. 2. Резонансные кривые измерительного резонатора: $U_b = 0$ (1), 30 (2), 60 (3) и 100 V (4).

потерь $\text{tg } \delta = \xi^{-1}(Q_0^{-1} - Q_{00}^{-1})$ и малосигнальная амплитуда СВЧ напряжения [7]

$$U_c = \sqrt{4P_{\text{inc}}\xi(\omega_0 C_0)^{-1}Q_0|S_{21}|(1 - |S_{21}|)}, \quad (1)$$

где P_{inc} — падающая мощность СВЧ, ξ — коэффициент включения конденсатора в резонатор,

$$\xi = 2 \left[1 + [\omega_0 C_0 Z_S + (\omega_0 C_0 Z_S)^{-1}] \times \left[\frac{\pi}{2} + \arctg(\omega_0 C_0 Z_S)^{-1} \right] \right]^{-1}.$$

Для всех исследуемых конденсаторов $\text{tg } \delta$ составлял $0.01 \dots 0.02$ при комнатной температуре ($T = 300$ K) и $0.02 \dots 0.04$ при азотной температуре ($T = 78$ K). Для примера в таблице приведены малосигнальные характеристики резонатора для двух исследуемых конденсаторов

Номер образца	T , K	C_0 , pF	ζ	$\text{tg } \delta$	Q_0	S_{21} , dB	f_0 , GHz	U_0^2 , V ²
1	78	0.92	0.25	0.04	66	-16.8	3.872	$1.2 \cdot 10^4$
2	300	0.66	0.19	0.02	91	-13.0	4.130	$8.0 \cdot 10^4$

Изменение сдвига резонансной частоты измерительного резонатора при приложении к STO-конденсатору напряжения смещения позволяет построить его вольт-фарадные характеристики. На рис. 3 показаны зависимости дифференциальной емкости C_d от U_b для образцов 1 и 2, представленных в таблице. Из рис. 3 видно, что напряжение смещения $U_b = 100$ V, которому соответствует усредненная напряженность поля в зазоре $E = U_b/s \approx 10^7$ V/m, приводит к снижению емкости STO-конденсатора в ~ 2 раза при $T = 78$ K и в ~ 1.2 раза при $T = 300$ K.

Результаты исследования нелинейного поведения SrTiO₃ конденсатора на СВЧ

Исследование нелинейного отклика STO-конденсаторов на сигнал СВЧ проводилось с использованием описанного выше микрополоскового резонатора (рис. 1) в режимах гармонического (однотонного) и бигармонического (двухтонного) возбуждения.

В однотонном режиме измерялась зависимость мощности СВЧ сигнала на выходе резонатора (P_{out}) от падающей мощности (P_{inc}) на малосигнальной резонансной частоте f_0 . Экспериментальные характеристики передачи, измеренные при $T = 78$ и 300 K, показаны на рис. 4. При $T = 78$ K отмечалось характерное для колебательной цепи с нелинейной емкостью уменьшение коэффициента передачи резонатора при $P_{\text{inc}} > +26$ dBm, что соответствует амплитуде СВЧ напряжения на конденсаторе $U_c > 12$ V. При $T = 300$ K в том же диапазоне

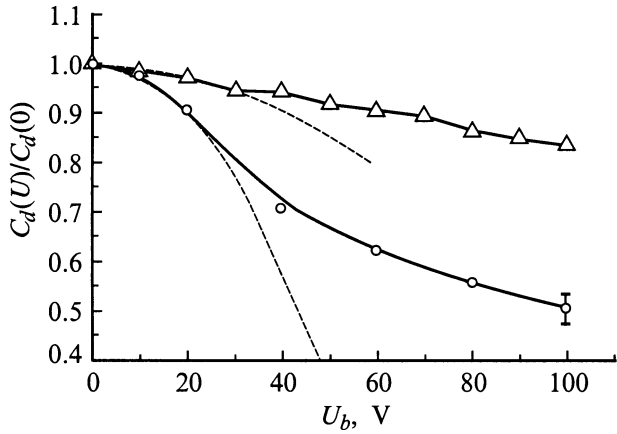


Рис. 3. Малосигнальные вольт-фарадные характеристики STO-конденсаторов, измеренные при $T = 78$ (○) и 300 К (△). Штриховые кривые — аппроксимация этих зависимостей выражением (3) для $U_0^2 = 1.2 \cdot 10^4$ и $8 \cdot 10^4$ V² при $T = 78$ и 300 К соответственно.

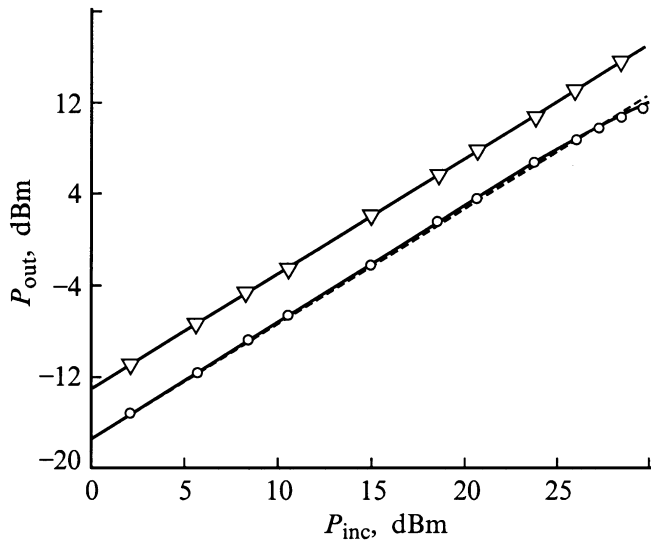


Рис. 4. Зависимость мощности на выходе резонатора от падающей мощности в режиме гармонического возбуждения. Экспериментальные данные для образца 1 при $T = 78$ (○) и образца 2 при $T = 300$ К (▽). Сплошные кривые — расчет, соответствующий выражению (5) при значениях параметра U_0^2 , полученных из аппроксимации вольт-фарадных характеристик. Штриховая кривая — зависимость $P_{out}(P_{inc})$ при $T = 78$ К для $U_0^2 = \infty$ (линейный конденсатор).

падающей мощности коэффициент передачи оставался неизменным.

Для исследования отклика STO-конденсатора на двухтоновой СВЧ сигнал использовалась стандартная методика измерения интермодуляционных искажений [8]. Два гармонических сигнала СВЧ одинаковой мощности ($P_{1inc} = P_{2inc}$) и близких частот ($f_1 = f_0 + \Omega$ и $f_2 = f_0 - \Omega$) подавались на вход измерительного резонатора. Нелинейная зависимость емкости STO-

конденсатора приводила к генерации сигналов комбинационных частот $f_s = \pm m f_1 \mp n f_2$ ($m, n = 0, 1, 2, \dots$), которые регистрировались на выходе резонатора анализатором спектра. Экспериментально измерялись мощности выходного сигнала P_{1out} и P_{3out} на основной частоте (f_1) и на комбинационной частоте третьего порядка ($f_3 = 2f_1 - f_2$) соответственно в зависимости от мощности P_{1inc} гармонической составляющей падающего сигнала при температурах 78 К и 300 и различных напряжениях смещения U_b . Все измерения проводились при условии $\Omega \leq 1$ МГц, обеспечивающем локализацию частот всех регистрируемых сигналов в полосе, много меньшей полосы пропускания резонатора.

Результаты экспериментальных исследований нелинейного отклика планарного STO-конденсатора на бигармонический СВЧ сигнал приведены на рис. 5 и 6. На рис. 5 показаны характеристики передачи резонатора на основной частоте и на комбинационной частоте 3-го порядка, измеренные при $T = 78$ К и $T = 300$ К. Рис. 6 иллюстрирует влияние постоянного напряжения смещения на характеристики передачи при азотной температуре; на дополнительной оси абсцисс приведены значения амплитуды СВЧ напряжения основной частоты на конденсаторе U_{c1} , рассчитанные в соответствии с выражением (1) для $U_b = 0$.

Как следует из рис. 5 и 6, во всем исследуемом диапазоне падающей СВЧ мощности ($P_{1inc} = 0 \dots +26$ dBm) при $T = 300$ К для STO-конденсаторов характерна кубическая зависимость P_{3out} от P_{1inc} и линейная зависимость P_{1out} от P_{1inc} . При $T = 78$ К кубическая и линейная характеристики передачи на комбинационной

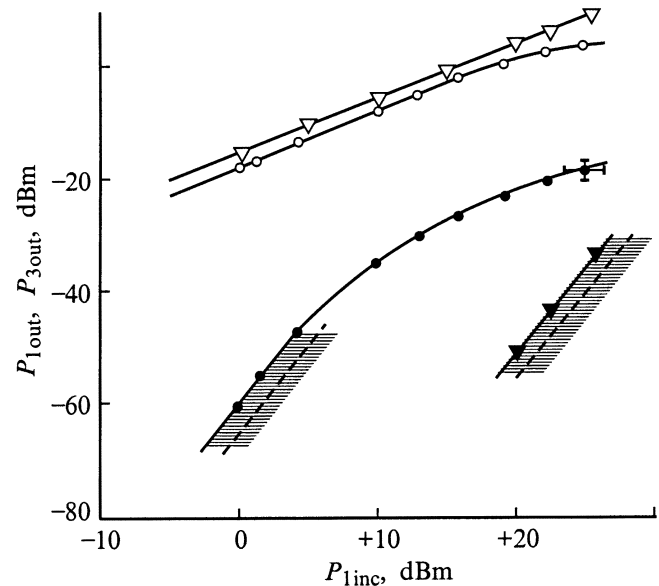


Рис. 5. Зависимости P_{1out} (○) и P_{3out} (●) от P_{1inc} , измеренные при $T = 78$ (○, ●) и $T = 300$ К (▽, ▼) и рассчитанные по формулам (9) для $T = 300$ К и (17) для $T = 78$ К (штриховые кривые). Заштрихованы области, соответствующие неточности определения величин, входящих в (9) и (17).

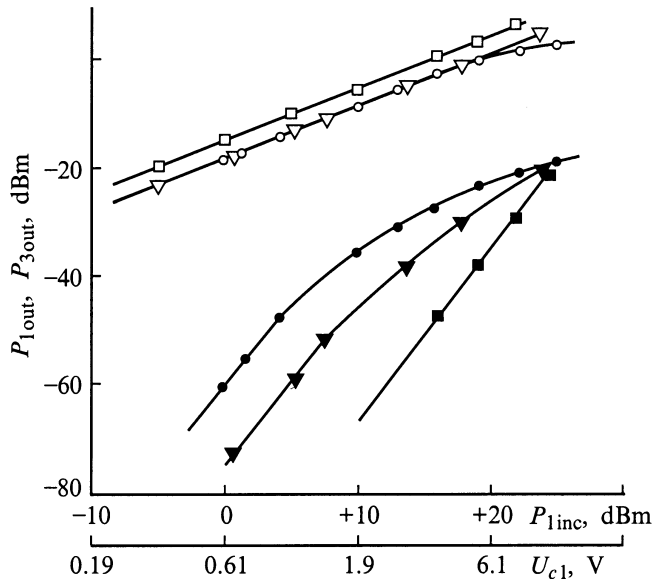


Рис. 6. То же, что на рис. 5, при различных напряжениях смещения на конденсаторе: $U_b = 0$ (○, ●), 20 (▽, ▼), 50 V (□, ■).

и основной частотах соответственно наблюдаются только на начальном участке рассматриваемого диапазона падающей мощности, причем на этом участке уровень P_{3out} относительно P_{1out} приблизительно на 50 dB превышает соответствующую величину, наблюдаемую при $T = 300$ K. С увеличением P_{inc} при $T = 78$ K имеет место ослабление зависимости выходной мощности от падающей на обеих частотах. Приложение постоянного напряжения смещения к конденсатору заметно подавляет сигнал комбинационной частоты 3-го порядка и увеличивает диапазон падающей мощности, в котором зависимость $P_{3out}(P_{inc})$ сохраняет кубический характер.

Обсуждение результатов

Так как нелинейный отклик STO-конденсатора обусловлен зависимостью емкости от мгновенных значений СВЧ напряжения на конденсаторе, вольт-фарадные характеристики являются базой для анализа полученных результатов. Поскольку амплитуда СВЧ напряжения основной частоты на конденсаторе не превышала 30 V, то достаточно рассмотреть только начальный участок вольт-фарадной характеристики, на котором нелинейная зависимость емкости конденсатора от напряжения $C(U)$ может быть представлена двумя членами степенного ряда

$$C(U) = C_0 \left(1 - \frac{U^2}{U_0^2} \right), \quad (2)$$

где U_0 — феноменологический параметр, имеющий размерность напряжения и ответственный за количественное описание зависимости $C(U)$.

Так как на СВЧ измеряется дифференциальная емкость C_d , то для аналитического описания начального участка экспериментальных вольт-фарадных характеристик следует использовать выражение

$$C_d(U) = C_0 \left(1 - 3 \frac{U^2}{U_0^2} \right). \quad (3)$$

Аппроксимация экспериментальных вольт-фарадных характеристик функцией (3) позволяет оценить параметр U_0^2 . Для исследованных конденсаторов значение U_0^2 при $T = 300$ K составляло $\sim 10^5$ V², а при $T = 78$ K — $\sim 10^4$ V². Для двух конденсаторов значение U_0^2 приведено в таблице, а на рис. 3 штриховыми кривыми показана аппроксимация начального участка вольт-фарадной характеристики функцией (3) для тех же образцов.

Основываясь на соотношении (2), получим выражения для характеристик передачи резонатора в однотонном и в двухтонном режимах возбуждения резонатора.

Вблизи резонансной частоты эквивалентная электрическая схема измерительного резонатора может быть представлена параллельным колебательным контуром, показанным на рис. 7, а, где X_{coupl} — сопротивление элемента связи резонатора с внешними цепями; L', C', G' — соответственно эквивалентные индуктивность, емкость, проводимость резонансного отрезка микрополосковой линии; C, g — емкость и проводимость STO-конденсатора, $g = \omega_0 C_0 \tan \delta$. Эквивалентные параметры контура определяются из выражений

$$\omega_0^2 = \frac{1}{L'(C' + C_0)}, \quad Q_{00} = \frac{1}{\omega_0 L' C'}, \quad \xi = \frac{C_0}{C' + C_0}.$$

Дальнейшее упрощение эквивалентной схемы при симметричной связи резонатора с внешними цепями для случая однотонного возбуждения приводит к схеме с эквивалентным генератором тока амплитудой $I = 2mI_{inc}$ (рис. 7, б), где $I_{inc} = \sqrt{2Z_0^{-1}P_{inc}}$ — амплитуда тока падающей волны, Z_0 — волновое сопротивление внешних линий передачи, m — коэффициент трансформации импеданса внешних линий в резонатор (при слабой связи $m \approx Z_0/X_{coupl}$). Дифференциальное уравнение для вынужденных колебаний в эквивалентном параллельном контуре

$$\frac{di}{dt} = \frac{u_c}{L'} + \left[G' + g + \frac{2m^2}{Z_0} \right] \frac{du_c}{dt} + C' \frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{d^2}{dt^2} [C(u_c)u_c], \quad (4)$$

где $i = I \cos(\omega t + \varphi)$, сводится к известному уравнению Дуффинга [9]. Для частот f , близких к малосигнальной резонансной частоте f_0 , решение уравнения Дуффинга для резонансной цепи представляет собой гармоническое колебание $u_c = U_c \cos(\omega t)$. Тогда, учитывая, что $U_c = m^{-1} \sqrt{2Z_0 P_{out}}$, из решения уравнения (4) с использованием (2) получим зависимость выходной мощности

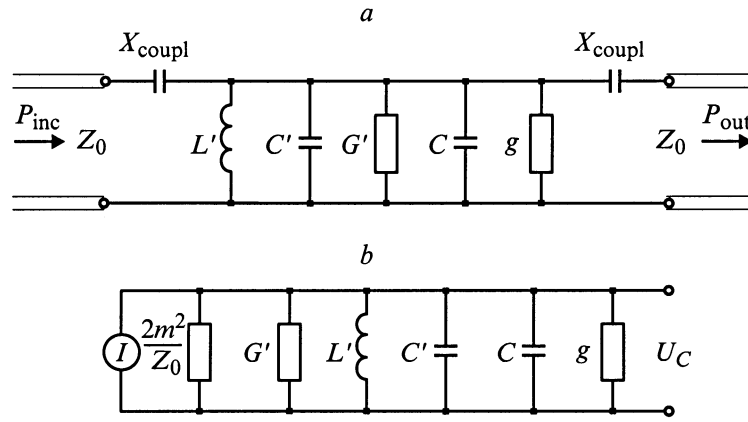


Рис. 7. Эквивалентная электрическая схема измерительного резонатора.

резонатора на фиксированной частоте от падающей мощности

$$P_{\text{out}} = 4 \frac{m^4}{Z_0^2} \times \frac{P_{\text{inc}}}{\left\{ \frac{1}{\omega L'} - \omega \left[C' + C_0 \left(1 - \frac{3}{2} \frac{Z_0 P_{\text{out}}}{m^2 U_0^2} \right) \right] \right\}^2 + \left(G' + g + \frac{2m^2}{Z_0} \right)^2}. \quad (5)$$

На рис. 4 сплошными линиями показаны характеристики передачи измерительного резонатора в однотонном режиме, рассчитанные в соответствии с выражением (5) для значений U_0^2 , полученных из аппроксимации вольт-фарадных характеристик выражением (3). Видно удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных характеристик как при $T = 78 \text{ K}$, так и при $T = 300 \text{ K}$. Очевидно, что нелинейность STO-конденсаторов при $T = 300 \text{ K}$ недостаточна для заметного искажения резонансной характеристики в исследованном диапазоне падающей мощности вплоть до $+30 \text{ dBm}$ (что соответствует $U_c \approx 27 \text{ V}$ для образца 2 при $T = 300 \text{ K}$). При $T = 78 \text{ K}$ (образец 1) наблюдаемое экспериментально снижение коэффициента передачи на заданной частоте f_0 связано со сдвигом резонансной частоты за счет уменьшения среднего значения емкости исследуемого конденсатора $\bar{C} = C_0 [1 - (3/4)(U_c^2/U_0^2)]$ под действием напряжения СВЧ. Эти результаты свидетельствуют о том, что диэлектрическая проницаемость пленки титаната стронция безинерционно следует за изменением электрического поля с частотой 4 GHz .

В режиме бигармонического возбуждения резонатора при напряжении на конденсаторе $u_c(t) = U_{c1}(\cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t))$ (U_{c1} — амплитуда напряжения основной частоты) ток через нелинейный конденсатор

$$i_c = \frac{d}{dt} [C(u_c(t))u_c(t)] \quad (6)$$

содержит составляющую комбинационной частоты 3-го порядка $\omega_3 = 2\omega_1 - \omega_2$

$$i_{c3} = \frac{3}{4} \omega_3 C_0 \frac{U_{c1}^3}{U_0^2} \sin(\omega_3 t). \quad (7)$$

Тогда амплитуда напряжения комбинационной частоты на конденсаторе

$$U_{c3} = \frac{3}{4} \frac{U_{c1}^3}{U_0^2 \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta}}. \quad (8)$$

Учитывая условие $\omega_3 \approx \omega_0$, можно считать параметры резонатора (ξ, Q_0, S_{21}) и распределение амплитуд напряжений и токов вдоль резонатора на обеих частотах одинаковыми. Тогда, комбинируя (1) и (8), для мощности сигнала комбинационной частоты на выходе резонатора получим

$$P_{3\text{out}} = \frac{9\xi^2 Q_0^2 |S_{21}|^4 (1 - |S_{21}|)^2 P_{\text{inc}}^3}{\omega_0 C_0 (1 + \text{tg}^2 \delta) U_0^4} = A \frac{P_{\text{inc}}^3}{U_0^4}. \quad (9)$$

Согласно выражению (9), в диапазоне падающей мощности, в котором коэффициент передачи резонатора на основной частоте $|S_{21}|$ можно считать неизменным, log-log характеристика передачи резонатора на комбинационной частоте 3-го порядка линейна с наклоном 3, что и наблюдалось экспериментально во всем исследованном диапазоне P_{inc} при $T = 300 \text{ K}$ и на начальном участке характеристики при $T = 78 \text{ K}$ (рис. 5 и 6). Изменение наклона log-log характеристики передачи с увеличением мощности при $T = 78 \text{ K}$ можно связать с изменением коэффициента передачи нелинейного резонатора на заданной частоте.

Для $T = 300 \text{ K}$ величина $P_{3\text{out}}$, рассчитанная согласно (9) для значения U_0^2 , полученного из малосигнальной вольт-фарадной характеристики, дает удовлетворительное соответствие с экспериментом. На рис. 5 штриховыми линиями представлена зависимость $P_{3\text{out}}(P_{\text{inc}})$ для $T = 300 \text{ K}$. Для азотной температуры, рассчитанный из

(9), уровень $P_{3\text{out}}$ оказывается примерно на 30 dB ниже экспериментального.

Усиление нелинейного отклика STO-конденсатора на бигармонический сигнал СВЧ при азотной температуре может быть обусловлено модуляцией емкости при периодическом (с частотой биений $2\Omega = f_1 - f_2$) изменении температуры активной области конденсатора за счет рассеиваемой СВЧ мощности. Вклад этого механизма в нелинейный отклик конденсатора следует учитывать, если удовлетворяется неравенство $2\pi(2\Omega)\tau < 1$, где τ — время тепловой релаксации конденсатора. Перегрев активной области конденсатора за счет рассеиваемой в пленке титаната стронция СВЧ мощности и время тепловой релаксации мы оценили из решения уравнения теплопроводности при условиях отсутствия теплообмена на границе пленка SrTiO₃–воздух; непрерывности теплового потока на границе пленка SrTiO₃–подложка; неизменности температуры обратной стороны подложки. При этих условиях перегрев пленки титаната стронция может быть представлен как

$$T - T_0 = \frac{P_{\text{dis}}}{2W\lambda_f} \left[\frac{h}{s} + \frac{2}{\pi} \frac{\lambda_f}{\lambda_{\text{sub}}} \ln \left(\frac{\pi H}{s} \right) \right], \quad (10)$$

где T_0 — температура окружающей среды; P_{dis} — мощность СВЧ, рассеиваемая в пленке титаната стронция; λ_f , λ_{sub} — коэффициенты теплопроводности пленки титаната стронция и подложки соответственно.

Используя аналогию между уравнениями теории электричества и теории теплопроводности, выражение (10) можно записать как

$$T - T_0 = \frac{P_{\text{dis}}\tau}{C_T}, \quad (11)$$

где $C_T = C_v V$ — теплоемкость конденсатора, C_v — удельная теплоемкость титаната стронция, $V = shW$ — объем активной области конденсатора.

Сравнивая (10) и (11), получим выражение для времени тепловой релаксации

$$\tau = \frac{C_v h^2}{2\lambda_f} \left[1 + \frac{2}{\pi} \frac{\lambda_f s}{\lambda_{\text{sub}} h} \ln \left(\frac{\pi H}{s} \right) \right]. \quad (12)$$

Для монокристаллических сапфира и титаната стронция коэффициенты теплопроводности равны соответственно 900 и $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ при $T = 78 \text{ K}$ и 25 и $6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ при $T = 300 \text{ K}$ [1]. Тогда для исследованных конденсаторов время тепловой релаксации составляет $\tau \approx 10^{-7} \text{ s}$ при $T = 300 \text{ K}$ и $\tau \approx 10^{-8} \text{ s}$ при $T = 78 \text{ K}$. Таким образом, в наших экспериментах при $2\Omega \leq 2 \cdot 10^6 \text{ Hz}$ неравенство $2\pi(2\Omega)\tau \leq 1$ удовлетворяется при азотной температуре.

При наличии двух механизмов модуляции емкости конденсатора за счет изменения электрического поля в пленке титаната стронция и за счет изменения ее температуры T при не слишком больших диапазонах изменения поля и температуры емкость конденсатора

может быть представлена как

$$C(U, T) = C_0 \left[1 - \frac{U^2}{U_0^2} - K_T(T - T_0) \right], \quad (13)$$

где коэффициент K_T определяет количественное описание зависимости емкости от температуры вблизи $T = 78 \text{ K}$, где для исследуемых пленок титаната стронция наблюдается отклонение от закона Кюри–Вейсса.

Экспериментальные температурные зависимости емкости STO-конденсаторов, аналогичных рассматриваемым, приведены в [7], откуда вблизи $T = 78 \text{ K}$ можно оценить коэффициент K_T как $K_T \approx 10^{-2} \text{ K}^{-1}$.

В двухтонном режиме СВЧ мощность, рассеиваемая в активной области пленки титаната стронция, колеблется с частотой биений 2Ω

$$P_{\text{dis}} = \omega_0 C_0 \text{tg} \delta U_{c1}^2 (1 + \cos(2\Omega t)). \quad (14)$$

Используя (6) и (13) с учетом (11) и (14), получим составляющую тока комбинационной частоты 3-го порядка через нелинейный конденсатор, обусловленную тепловой модуляцией емкости,

$$i_{c3}^T = \frac{1}{2} \frac{K_T \omega_0 C_0 \tau \text{tg} \delta}{C_v V} \omega_3 C_0 U_{c1}^3 \sin(\omega_3 t). \quad (15)$$

Вводя обозначение

$$U_{0T}^2 = \frac{3}{2} \frac{C_v V}{K_T \omega_0 C_0 \tau \text{tg} \delta}, \quad (16)$$

приведем выражение (15) к виду (7). Окончательно мощность сигнала комбинационной частоты на выходе резонатора при $T = 78 \text{ K}$ приобретает вид

$$P_{3\text{out}} = A P_{1\text{inc}}^3 \left(\frac{1}{U_0^2} + \frac{1}{U_{0T}^2} \right)^2, \quad (17)$$

где множитель A определен в выражении (9).

В частности, для образца $1 U_{0T}^2 \approx 10^3 \text{ V}^2$, так что учет тепловой нелинейности емкости приводит к увеличению расчетных значений $P_{3\text{out}}$ приблизительно на 20 dB на рис. 5 штриховыми линиями показана расчетная зависимость $P_{3\text{out}}(P_{1\text{inc}})$ для $T = 78 \text{ K}$, полученная в соответствии с выражением (17). Учитывая неточности определения величин, входящих в выражение (17), можно считать, что приведенные оценки разумно соответствуют экспериментальным данным. Приложение постоянного напряжения смещения, ослабляя температурную зависимость емкости конденсатора (уменьшая K_T), приводит к увеличению параметра U_{0T} . Это отражается на экспериментальных характеристиках передачи резонатора (рис. 6) снижением уровня сигнала комбинационной частоты $P_{3\text{out}}$ относительно $P_{1\text{inc}}$ и расширением диапазона падающей мощности, в котором коэффициент передачи остается неизменным и зависимость $P_{3\text{out}}(P_{1\text{inc}})$ имеет кубический характер.

Для дополнительной проверки правильности этого вывода мы провели эксперименты, в которых при $T = 78 \text{ K}$

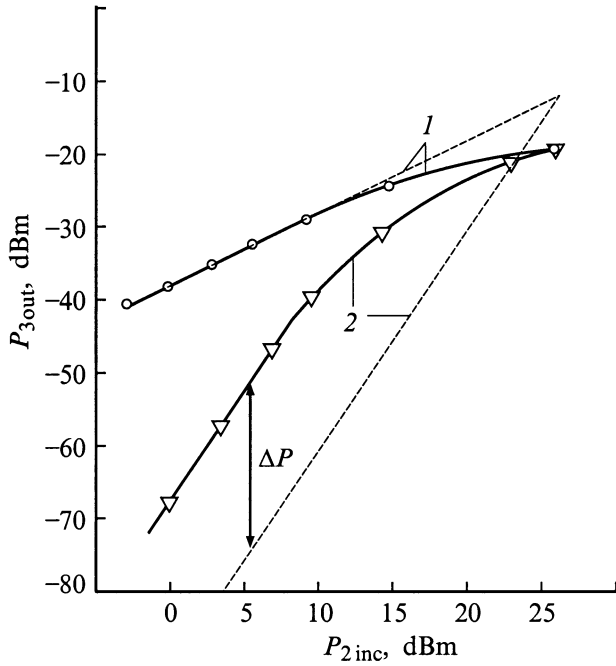


Рис. 8. Зависимость P_{3out} от P_{2inc} . \circ, ∇ — экспериментальные данные при одинаковом значении параметра U_0 . Разность уровней сигналов комбинационной частоты для кривых 2 определяет изменение параметра U_0 за счет модуляции температуры конденсатора с частотой $2\Omega = f_1 - f_2$.

измеряли зависимость мощности сигнала комбинационной частоты на выходе резонатора (P_{3out}) при возбуждении его бигармоническим сигналом с различной глубиной модуляции амплитуды. В процессе измерений мощность одной из составляющих падающего сигнала (P_{2inc}) изменялась в пределах -10 dBm... $+26$ dBm, тогда как мощность второй составляющей (P_{1inc}) оставалась неизменной и составляла $+26$ dBm. Результаты этих измерений приведены на рис. 8 (значки на кривой 1). При $P_{2inc} \ll P_{1inc}$, когда модуляцией амплитуды СВЧ напряжения на конденсаторе можно пренебречь, аналитическое выражение для зависимости P_{3out} от (P_{2inc}) имеет вид

$$P_{3out} = AP_{1inc}^2 P_{2inc} \frac{1}{U_0^4}. \quad (18)$$

Соответствующая (18) расчетная зависимость P_{3out} от P_{2inc} при неизменном коэффициенте передачи S_{21} показана на рис. 8 штриховой кривой 1. На том же рис. 8 приведена уже обсуждавшаяся зависимость P_{3out} от P_{2inc} для случая возбуждения резонатора бигармоническим сигналом при одинаковых мощностях его составляющих ($P_{1inc} = P_{2inc}$) (кривые 2). Значки соответствуют экспериментальным данным, а штриховая кривая 2 — расчету по формуле (9) при том же значении параметра U_0 , что и для кривой 1. Видно, что при $T = 78$ К увеличение до 1 глубины модуляции амплитуды падающего на резонатор СВЧ сигнала приводит к заметному увеличению нелинейного отклика STO-конденсатора. На рис. 8 отмечена

разность $\Delta P \approx 22$ dB экспериментального и расчетного уровней сигнала комбинационной частоты, за которую оказывается ответственной модуляция температуры конденсатора с частотой биений $\Delta P \cong 10 \lg(U_0^4/U_{0T}^4)$. Полученная из этих измерений величина U_{0T} согласуется с приведенными выше оценками.

Следует отметить, что наблюдаемое нами при $T = 78$ К усиление нелинейного отклика STO-конденсатора на двухтонный СВЧ сигнал может быть подавлено использованием подложки с меньшей, чем для сапфира, теплопроводностью, так как это приведет к увеличению времени тепловой релаксации и в результате к установлению неизменной во времени повышенной по сравнению с T_0 температуры пленки титаната стронция.

Заключение

Исследован нелинейный отклик планарных конденсаторов на основе тонких пленок титаната стронция на подложке из монокристаллического сапфира на интенсивное поле СВЧ при $T = 78$ и 300 К. Показано, что при $T = 300$ К нелинейное поведение на СВЧ может быть предсказано на основе зависимости малосигнальной емкости от постоянного напряжения с использованием приведенного выше выражения (9). При $T = 78$ К благодаря малому времени тепловой релаксации STO-конденсатора нелинейное поведение оказывается различным в зависимости от характера возбуждающего СВЧ сигнала. Отклик STO-конденсатора на гармонический СВЧ сигнал соответствует нелинейности, регистрируемой на малосигнальной вольт-фарадной характеристике. Однако периодическая тепловая модуляция емкости с частотой биений приводит к значительному усилению нелинейного отклика на бигармонический сигнал СВЧ при близких частотах, его составляющих. Получены выражения для описания нелинейного поведения STO-конденсаторов на СВЧ как для $T = 300$ К, так и для $T = 78$ К.

Приведенные результаты исследования нелинейного поведения планарных конденсаторов на основе тонких пленок титаната стронция могут быть полезны разработчикам устройств микроэлектроники СВЧ при оптимизации топологии СВЧ цепей, использующих нелинейные STO-конденсаторы, с целью снижения нежелательных нелинейных искажений.

Авторы выражают признательность А.М. Прудану, В.Е. Логинову за представленные образцы и профессору О.Г. Вендику за полезные обсуждения результатов.

Список литературы

- [1] Вендик О.Г. Сегнетоэлектрики в технике СВЧ. М.: Сов. радио, 1979. 271 с.
- [2] DiDomenico M., Johnson D.A., Pantell R.H. // Appl. Phys. 1962. Vol. 33. N 5. P. 1697–1704.
- [3] Kozyrev A.B., Keis V.N., Koepf G. et al. // Microelectronics Engineering. 1995. Vol. 29. P. 257–260.

- [4] *Findikoglu A.T., Jia Q.X., Reagor D.W.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1997. Vol. 7. N 2. P. 2925–2928.
- [5] *Findikoglu A.T., Jia Q.X., Reagor D.W., Wu K.D.* // Electron. Lett. 1995. Vol. 31. N 21. P. 1814–1815.
- [6] *Gevorgian S.S., Kaparkov D.I., Vendik O.G.* // IEE Proc. Microw. Antennas Propag. 1994. Vol. 141. N 6. P. 501–503.
- [7] *Kozyrev A.B., Samoiloa T.B., Golovlov A.A.* et al. // J. Appl. Phys. 1998. Vol. 84. N 6. P. 3326–3332.
- [8] *Jacobi J.H.* // Microwaves & RF. 1986. P. 119–125.
- [9] *Филиппов Е.* Нелинейная электродинамика. М.: Энергия, 1976. 495 с.