

Исследование параметров сегнетоэлектрических конденсаторов на подложке карбида кремния под действием СВЧ сигнала высокой мощности

А.Г. Гагарин, И.В. Котельников, А.В. Тумаркин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: характеристики электрически управляемых нелинейных конденсаторов на основе сегнетоэлектрической плёнки титаната бария-стронция на подложке карбида кремния исследованы под действием СВЧ сигнала высокой мощности. Представлены методы оценки искажения параметров вследствие диэлектрической нелинейности и локального перегрева. Показано, что использование карбида кремния позволяет существенно снизить влияние перегрева за счёт высокой теплопроводности материала подложки.

Ключевые слова: СВЧ сигнал высокой мощности, нелинейность, перегрев, сегнетоэлектрики, карбид кремния

1. Введение

Использование нелинейных диэлектрических материалов – сегнетоэлектриков – открывает возможности к созданию новых устройств как на основе явлений статической нелинейности сегнетоэлектриков (СЭ) (линейный режим возбуждения – диэлектрическая проницаемость меняется только под действием управляющего поля), так и динамической нелинейности (нелинейный режим возбуждения – диэлектрическая проницаемость меняется как под действием постоянного управляющего поля, так и под действием рабочего радиосигнала) [1]. При этом возникает необходимость в обеспечении эффективного теплоотвода из активных областей СЭ структур, который затруднён недостаточной теплопроводностью традиционных диэлектрических подложек. Осаждение пленки СЭ на кристалл карбида кремния, теплопроводность которого на порядок выше, чем у сапфира и уступает только алмазу, позволяет существенно увеличить рабочую мощность СВЧ устройств на основе СЭ, при этом обеспечивая совместимость с полупроводниковой технологией.

В работе представлены методы и результаты экспериментальных исследования плёнок титаната бария-стронция на подложке карбида кремния при повышенном уровне мощности СВЧ сигнала.

2. Подготовка образцов и экспериментальные результаты

Для осаждения сегнетоэлектрической плёнки была использована подложка из полуизолирующего карбида кремния политаипа 6Н (6Н-SiC) эпитаксиального качества диаметром 3 дюйма вырезанная из монокристалла, изготовленного АО «Светлана-Электронприбор». Объёмное сопротивление подложки составляло около $2.7 \cdot 10^{11}$ Ом·см, СВЧ потери на 6 ГГц около $\text{tg}\delta = 10^{-4}$, шероховатость поверхности – менее 1 нм.

Тонкие BSTO плёнки на подложке SiC были получены методом ионно-плазменного ВЧ магнетронного распыления керамической мишени состава $\text{Ba}_{0.4}\text{Sr}_{0.6}\text{TiO}_3$. Плёнки BSTO осаждались непосредственно на подложку SiC без использования буферных слоёв в атмосфере чистого кислорода при давлении 2 Па.

Осаждение проводилось при различных температурах в интервале 800–880 °С. После осаждения образцы охлаждались в атмосфере кислорода со скоростью 2–3 °С/мин. Толщина СЭ плёнок составляла около 1 мкм [2]. Для получения планарных конденсаторов на СЭ образцы наносилась плёнка меди толщиной 1 мкм, на которой методом фотолитографии создавались планарные конденсаторы с шириной и длиной зазора 5 и 800 мкм соответственно.

Исследования конденсаторов под повышенным уровнем мощности проводились с использованием $\lambda/4$ коаксиального резонатора. Для исследованных величин ёмкости конденсаторов C резонансная частота составляла $f_0 \approx 3$ ГГц при собственной добротности резонатора 2000. Подробное описание методики измерения ёмкости и добротности конденсаторов приведено в работе [3]. С использованием векторного анализатора HP 8719C исследовалась измерительная цепь, приведённая на рис. 1.

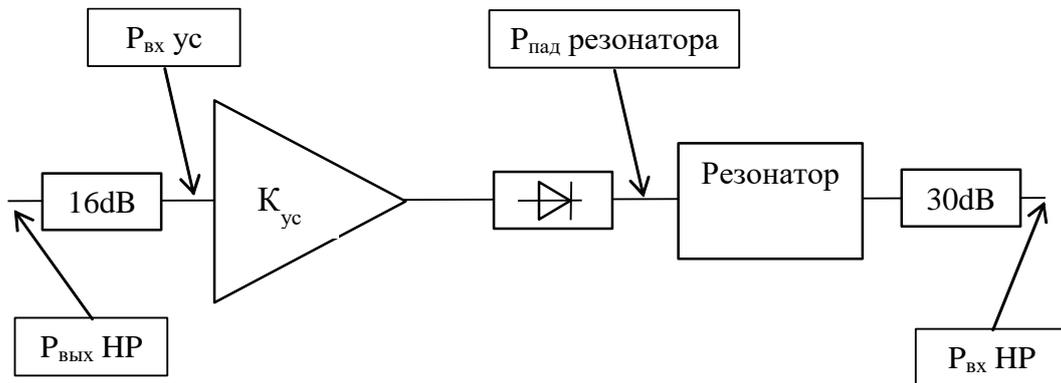


Рисунок 1. Блок-схема измерительной цепи.

Максимальная мощность выходного сигнала используемого анализатора составляла 20 дБм. Усилитель мощности Mini-Circuits ZHL-42 (50 Ом, полоса частот от 700 до 4200 МГц) имеет ограничение по мощности входного сигнала (не более 5 дБм), поэтому на его входе был установлен аттенюатор 16 дБ. Усилитель имеет коэффициент усиления $K_{ус} \sim 30$ дБ. Для защиты выходных цепей усилителя на рассогласованную нагрузку (которой является резонатор в широком диапазоне частот) использовался вентиль с величиной ослабления в прямом направлении ~ 2.5 дБ в рабочей полосе частот. Далее устанавливался исследуемый резонатор, выход которого соединялся со входом анализатора цепей через аттенюатор 30 дБ для исключения выхода из строя входных детекторных цепей прибора.

Для обеспечения точности измерений была проведена калибровка измерительной цепи и экспериментальное определение коэффициента усиления усилителя на всех использованных уровнях мощности (см. табл. 1).

Таблица 1. Калибровка измерительной цепи

P _{вых} НР, дБм	P _{вх} ус, дБм	K _{ус} усилителя, дБ	P _{пад} резонатора		P _{вх} НР, дБ
			дБм	мВт	
-10	-26	35.9	7.4	5.5	-12.6
0	-16	35.9	17.4	55	-12.6
5	-11	35.9	22.4	174	-12.6
10	-6	35.7	27.2	525	-12.8
15	-1	32.5	29	794	-16
20	4	29.4	30.9	1230	-19.1

Амплитуда напряжения СВЧ сигнала на конденсаторе может быть определена, исходя из характеристик резонансной кривой и величины СВЧ мощности, падающей

на резонатор $P_{\text{пад}}$.

$$U_m = \sqrt{\frac{4P_{\text{пад}} \xi Q_0 T(1-T)}{2\pi f_0 C}}, \quad (1)$$

где Q_0 – ненагруженная добротность резонатора с включённым конденсатором, T – коэффициент прохождения на резонансной частоте и ξ – коэффициент включения конденсатора в резонатор. Вычисление коэффициента включения ξ производится, исходя из зависимости резонансной частоты от ёмкости исследуемого конденсатора $f_0(C)$ по формуле:

$$\xi = -\frac{C}{f_0} \frac{df_0(C)}{dC}. \quad (2)$$

Зависимость $f_0(C)$ определяется путём проведения калибровочных измерений и дальнейшей их аппроксимацией непрерывной функцией.

Ёмкость планарных конденсаторов на основе BSTO плёнки, выращенной на подложке SiC составила 0.40 пФ, что соответствует диэлектрической проницаемости около $\varepsilon \cong 500$. На рисунке 2 представлена зависимость ёмкости от напряжения (ВФХ), которая показывает управляемость $n \cong 1.7$ при 300 В и добротность около 50 на 1.5 ГГц.

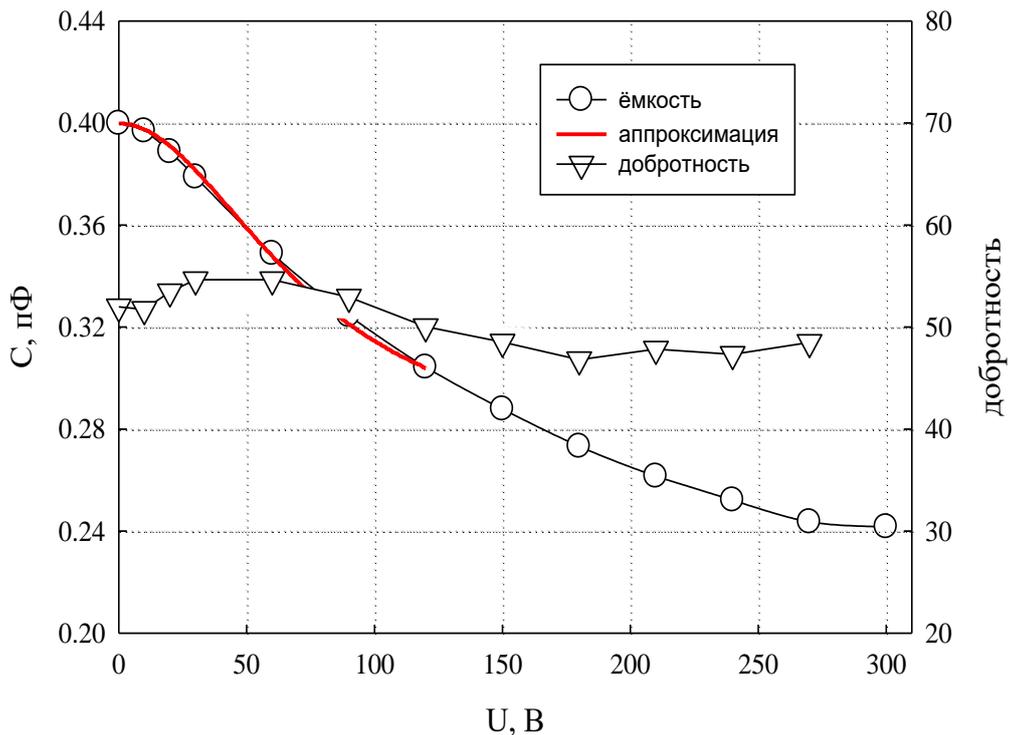


Рисунок 2. Ёмкость и добротность конденсатора в зависимости от приложенного напряжения

Зависимость ёмкости конденсаторов была нормирована на ёмкость при нулевом напряжении $C(0)$ (рис.1) и была аппроксимирована выражением

$$C/C(0) = \frac{1}{k} \left[1 + \frac{k-1}{1+(U/U_0)^2} \right]. \quad (3)$$

где k и U_0 – параметры аппроксимации: $C(0) = 0.4$ пФ, $k = 1.5$ и $U_0 = 75$.

Было проведено измерение параметров резонансной кривой резонатора с включенным конденсатором под действием различных уровней СВЧ мощности. Падающая на резонатор мощность изменялась в пределах $P_{inc} = (10^{-2} \text{ to } 1.6)$ Вт. Амплитуды СВЧ сигнала оценивались по выражению (1).

На рисунке 6.2 показано влияние СВЧ сигнала высокой мощности на вид резонансной кривой ($\Delta f = f - f_0$, где f – измеряемая резонансная частота и f_0 – резонансная частота при малосигнальных измерениях). Смещение резонансной частоты может быть пересчитано в изменение ёмкости ΔC_{Σ} [3].

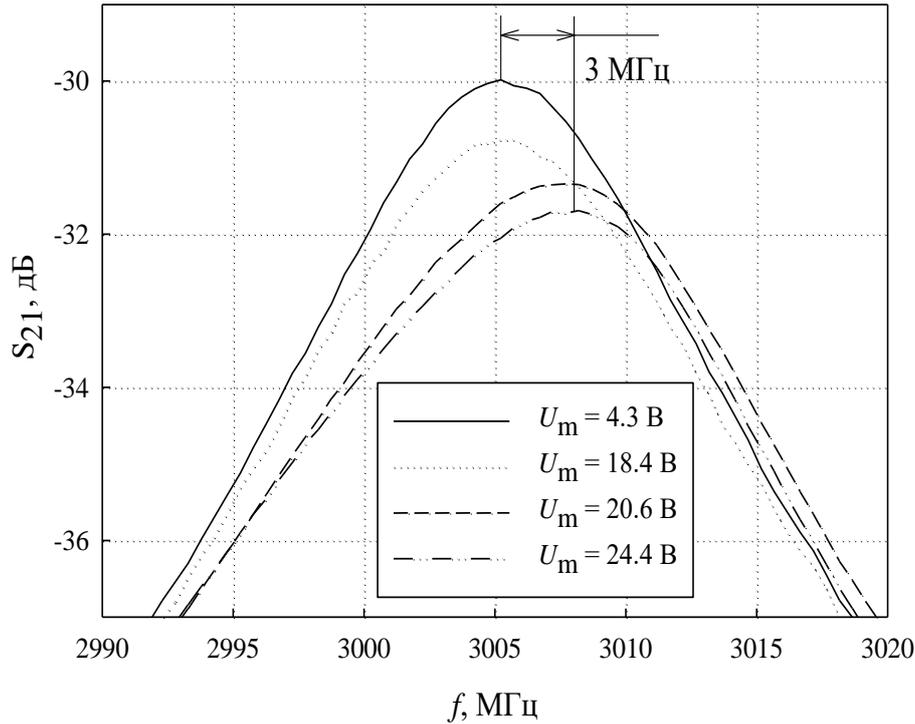


Рисунок 3. Резонансная кривая при различных амплитудах СВЧ напряжения

В работе [4] было получено выражение, которое оценивает изменение ёмкости из-за электрической нелинейности конденсатора, исходя из его ВФХ

$$\Delta C_E / C(0) = \frac{k-1}{k} \left(\frac{U_m}{U_0} \right)^2 \quad (4)$$

Для приведённых выше параметров ВФХ может быть рассчитан сдвиг ёмкости в сторону её уменьшения $\Delta C_E / C(0) = 1.8\%$, что соответствует сдвигу резонансной частоты в сторону увеличения $\Delta f_0 = 2.9$ МГц согласно выражению

$$\Delta f_0 = -\frac{1}{2} f_0 \xi \frac{\Delta C}{C(0)} \quad (5)$$

Из искажения резонансной кривой на рисунке 3 сдвиг резонансной частоты можно оценить как 3 МГц, что с высокой точностью соответствует рассчитанному сдвигу. Таким образом, можно утверждать, что наблюдаемый сдвиг частоты вызван исключительно электрической нелинейностью, в то время как перегрев конденсатора на подложке карбида кремния никак не проявляется вплоть до амплитуд СВЧ сигнала 25 В.

Работа выполнена при финансовой поддержке **Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проектов № 18-37-00348 мол_а, №16-29-05147 офи_м, и Минобрнауки России (государственное задание № 3.3990.2017/4.6).**

Список литературы

1. Вендик, О.Г. Сегнетоэлектрики находят свою "нишу" среди управляющих устройств СВЧ / О. Г. Вендик // ФТТ — 2009. — Т. 51. — № 7. — С. 1441—1445.
2. Тумаркин, А.В. Сегнетоэлектрические пленки титаната бария-стронция на подложке полупроводящего карбида кремния / А. В. Тумаркин, [и др.] // ПЖТФ — 2016. — Т. 42. — № 8. — С. 70—77.
3. Козырев, А.Б. методика и устройство измерения емкости и добротности СВЧ варакторов и варикондов / А. Б. Козырев, [и др.] // Измерительная техника — 2012. — № 7. — С. 62—65.
4. Soldatenkov, O. Nonlinear properties of thin ferroelectric film-based capacitors at elevated microwave power / O. Soldatenkov, [at al.] // Applied Physics Letters. — 2006. — Vol. 89 — P. 232901 (1-3).