

УПРАВЛЯЕМЫЙ СЕГНЕТОКЕРАМИЧЕСКИЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ КОНДЕНСАТОР МАЛЫЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ НА РАДИОЧАСТОТАХ

Многие задачи современной электроники удобно решать с помощью нелинейных емкостных элементов, управляемых электрическим полем. В качестве таких элементов могут применяться сегнетокерамические конденсаторы, емкость которых изменяется под действием как переменного, так и постоянного электрического поля (без потребления тока). Достоинства таких конденсаторов – возможность плавного изменения параметров, малые энергозатраты, стойкость к повышенным уровням сигнала, высокое быстродействие, относительно низкая стоимость. Особый интерес для специальной аппаратуры, работающей в диапазоне частот 60–100 МГц, представляет управляемый высоковольтный конденсатор, емкость которого при подаче постоянного напряжения до 20 кВ изменяется не менее чем в два раза.



Б.Ротенберг, М.Листошина,
Л.Светлова, С.Тесленко

ответственно [3]. Таким образом, диэлектрические потери конденсатора в радиочастотном диапазоне 60–100 МГц должны быть как можно меньше, а коэффициент управляемости – достаточно высоким ($K \geq 2$ при $E_{\text{н}} = 2$ кВ/мм). Опыт [3,4] показывает, что конденсатор как управляющий элемент в указанном диапазоне частот эффективен при $M > 5000$.

Задача достижения такой эффективности и стояла при разработке управляемого сегнетоэлектрического конденсатора, рассчитанного на работу в указанном выше диапазоне радиочастот. Основная проблема заключалась в том, что применяемые в промышленности сегнетокерамические материалы имеют высокие диэлектрические потери, так как при рабочих температурах конденсатора в них преобладает сегнетоэлектрическая фаза. Следовательно, в конденсаторе необходимо было использовать сегнетоэлектрик, сохраняющий в области рабочих температур параэлектрическую фазу и обладающий к тому же достаточной нелинейностью характеристик.

Такие свойства присущи керамике на основе твердых растворов титаната бария с несегнетоэлектрической компонентой. Из многочисленных твердых растворов BaTiO_3 с точкой Кюри ниже комнатной температуры необходимо было выбрать такие, у которых степень размытия фазового перехода в сегнетоэлектрическое состояние минимальна. Это обусловлено присущей всем сегнетоэлектрикам с размытым фазовым переходом релаксационной поляризацией. В результате при определенной температуре наблюдается мак-

Представляем авторов статьи

РОТЕНБЕРГ Борис Абович. Доктор технических наук, профессор. Лауреат государственной премии СССР. Окончил Ленинградский электротехнический институт им. В.И.Ульянова (Ленина), специальность – физика диэлектриков и полупроводников. Начальник лаборатории НИИ "Гириконд".

ЛИСТОШИНА Марина Божидаровна. Окончила Ленинградский политехнический институт им. М.И.Калинина, специальность – диэлектрики и полупроводники. Инженер I категории НИИ "Гириконд".

СВЕТЛОВА Лидия Васильевна. Окончила Ленинградский технологический институт им. Ленсовета, специальность – технология стекла. Ведущий инженер НИИ "Гириконд".

ТЕСЛЕНКО Сергей Петрович. Окончил Ленинградский политехнический институт им. М.И.Калинина, специальность – экспериментальная ядерная физика. Старший научный сотрудник НИИ "Гириконд".

Контактный телефон (812) 552 0473, (812) 552 2450

Всем сегнетоэлектрикам свойственна нелинейность диэлектрической проницаемости, т.е. ее зависимость от приложенного напряжения, что и позволяет изготавливать на их основе управляемые электрическим полем нелинейные емкостные элементы [1,2]. Для сегнетоэлектрического конденсатора, емкость которого регулируется за счет изменения напряженности приложенного постоянного электрического поля, помимо обычных для всех конденсаторов параметров (емкости, диэлектрических потерь, электрической прочности и др.), важное значение имеет коэффициент управляемости K – отношение емкости конденсатора при нулевой напряженности поля C_0 к емкости C_E при заданной напряженности постоянного смещающего поля $(E_{\text{н}})_{\text{ном}}$ или $K = C_0/C_E$.

Эффективность работы нелинейного конденсатора как управляющего элемента определяет отношение коэффициента управляемости K к диэлектрическим потерям $\text{tg}\delta$:

$$M = \frac{(K - 1)^2}{K \cdot \text{tg}\delta_0 \cdot \text{tg}\delta_E},$$

где $\text{tg}\delta_0$ и $\text{tg}\delta_E$ – тангенс угла потерь при $E_{\text{н}}=0$ и $E_{\text{н}} = (E_{\text{н}})_{\text{ном}}$ со-

симум $\text{tg}\delta$, который с ростом рабочей частоты конденсатора сдвигается в область более высоких температур, что может привести к увеличению диэлектрических потерь в заданном радиочастотном диапазоне.

Наименее размытым фазовым переходом среди твердых растворов титаната бария отличаются системы состава $(\text{Ba},\text{Sr})\text{TiO}_3$. Они и были выбраны в качестве основы диэлектрика. Окончательно составы диэлектрика отрабатывались в системе $(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x)\text{TiO}_3\text{--CaTiO}_3\text{--MgO}$ при температурах точки Кюри ($+10\dots-10$) $^\circ\text{C}$ с использованием технических материалов и титаната бария, полученного алкоксидным методом [4,5]. Суть этого метода заключается в приготовлении в органическом растворителе смешанных сложных растворов, содержащих все элементы будущих оксидных соединений в необходимой пропорции, последующем гидролизе растворов и термообработке продуктов гидролиза. Полученные алкоксидным методом порошки характеризуются высокой дисперсностью, степень которой определяет температура термообработки. Исследования зависимости диэлектрической проницаемости от температуры показали, что наибольший интерес для ВЧ-конденсаторов (рис. 1) представляют материалы приведенной выше системы (при $x=0,28\dots0,30$) с $\epsilon \geq 3000$ и $\text{tg}\delta \leq 0,005$ на 60 МГц (при использовании технического сырья) и $\epsilon \geq 3000$ и $\text{tg}\delta \leq 0,006$ на 60 МГц (при использовании алкоксидного сырья). Степень размытия фазового перехода для таких материалов $\Delta T_{\epsilon/2} \approx 65^\circ\text{C}$.

Зависимость коэффициента управляемости K и $\text{tg}\delta$ опытных образцов диэлектрика (диски толщиной 1 мм и диаметром 10 мм) от величины напряженности постоянного смещающего поля показывает рост диэлектрических потерь с увеличением напряженности поля (рис. 2а). Однако при изготовлении конденсаторных заготовок (стержни диаметром 10 мм и высотой 10 мм) с соблюдением технологических режимов, обеспечивающих необходимую микроструктуру керамики, эта зависимость переходит в падающую (рис. 2б).

Если снижение диэлектрической проницаемости (рост K) с увеличением напряженности постоянного электрического поля – эффект ожидаемый, то расхождение полевых зависимостей $\text{tg}\delta$ требует объяснения. Увеличение диэлектрических потерь на частоте 60 МГц с ростом напряженности постоянного поля для образцов керамики $(\text{Ba},\text{Sr})\text{TiO}_3$ в паразлектрической фазе отмечалось и раньше [6]. Причем на частотах 10^3 и 10^6 Гц полевой зависимости не наблюдалось. Анализ полевой зависимости $\text{tg}\delta$ с учетом размеров зерен керамики рассмотренной выше системы показал, что с увеличением размеров зерна характер зависимости при определенной температуре изменяется с падающего на возрастающий (рис. 3) [7].

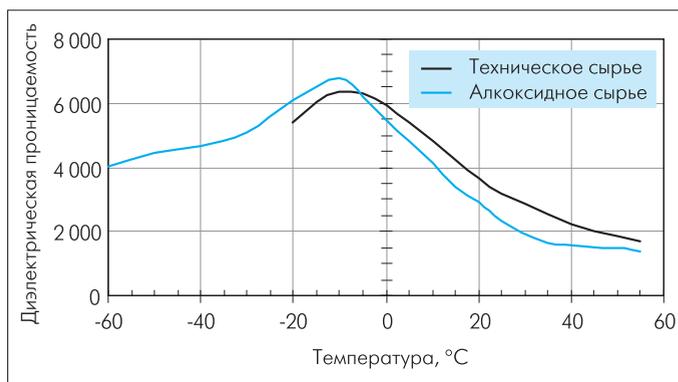


Рис. 1. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости материалов на основе твердого раствора $(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x)\text{TiO}_3$, полученных с использованием технического и алкоксидного сырья

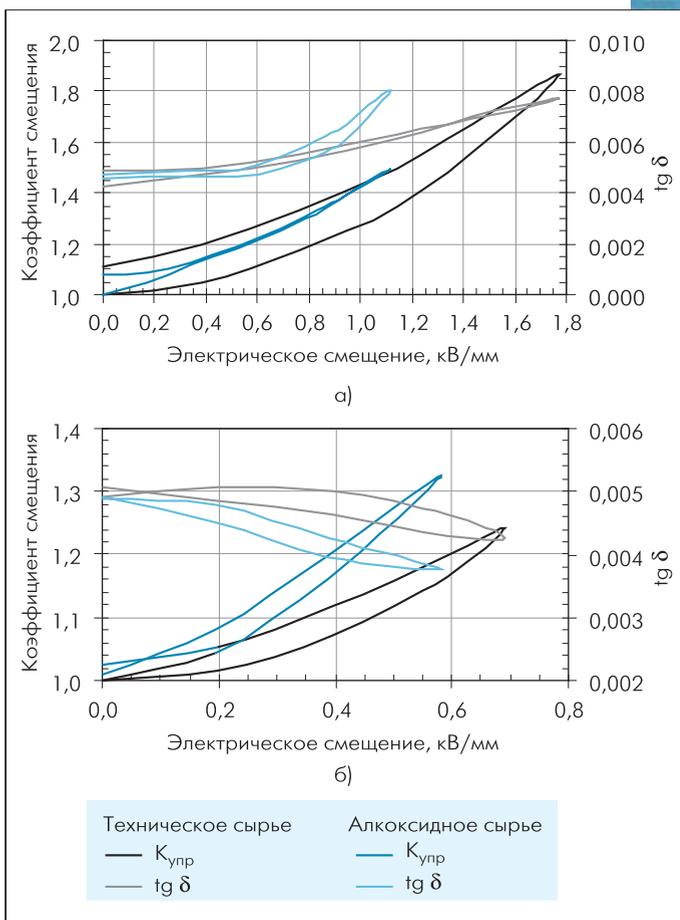


Рис. 2. Полевая зависимость коэффициента управляемости и тангенса угла диэлектрических потерь на частоте 60 МГц: а) опытных образцов диэлектрика, б) образцов, изготовленных с соблюдением оптимальных технологических режимов

Объяснение полевых зависимостей $\text{tg}\delta$ следует искать во внутренних потерях, присущих материалу как паразлектрику. Считается, что смещающее электрическое поле влечет за собой появление наведенного пьезоэффекта, приводящего к преобразованию энергии переменного электромагнитного поля в гиперзвук [8,9]. Подобное преобразование эффективно лишь в случае, когда размеры образцов сопоставимы с акустической длиной волны, т.е. на частоте собственного резонанса. Для пленок BaTiO_3 толщиной 1 мкм при частотной постоянной толщинных пьезоколебаний $k = f_R \cdot L = 250$ кГц·см (L – размер, определяющий резонансную частоту моды колебаний) резонансная частота составляет $2,5 \cdot 10^9$ Гц, что по порядку величины соответствует частоте, на которой наблюдается максимум $\text{tg}\delta$. При работе конденсаторов на частоте 60 МГц определяющий резонансную частоту характеристический размер образцов или отдельных заряженных образований в них должен составлять $L_x = 250/f_R = 43$ мкм. Поэтому при воздействии постоянного поля на образцы с кристаллитами такого размера возможно увеличение диэлектрических потерь за счет акустического механизма.

При больших толщинах материала могут возникнуть колебания самих образцов на относительно более низких резонансных частотах. Например, при толщине образца 1 см резонансная частота его колебаний равна 250 кГц. На рабочей частоте 60 МГц акустический механизм потерь не возникает, и $\text{tg}\delta$ снижается вследствие подавления постоянным полем колебаний границ остаточных доменов. При толщине 1 мм резонансная частота колебаний опытных образ-

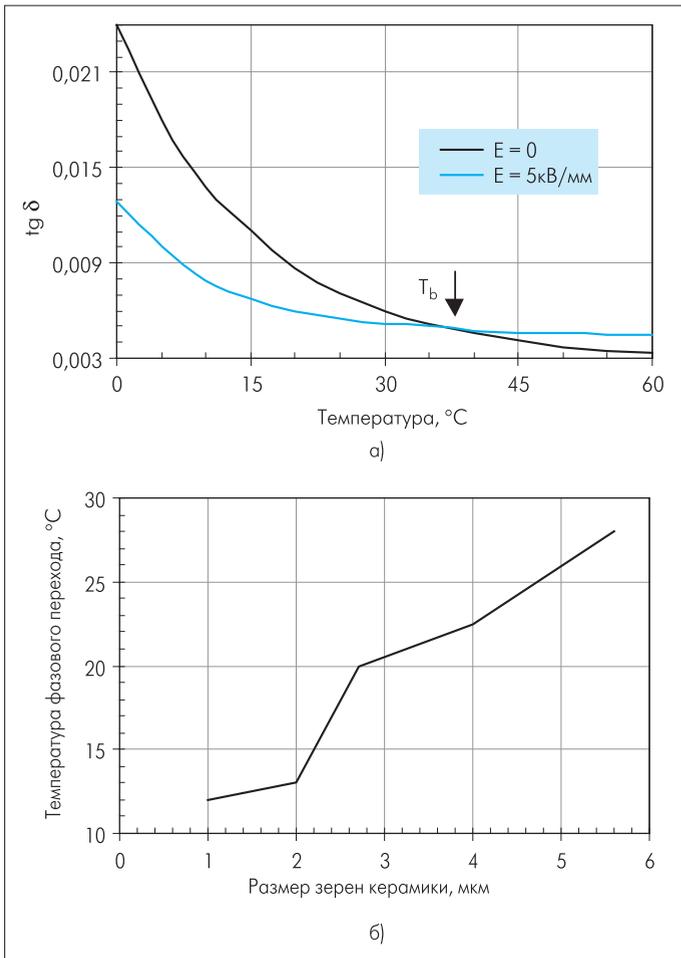


Рис. 3. а) Температурная зависимость $\text{tg } \delta$, показывающая изменение характера зависимости $\text{tg } \delta(E)$ для состава $(\text{Ba}_{0.65}\text{Sr}_{0.35})\text{TiO}_3$; б) температура перехода возрастающей зависимости $\text{tg } \delta(E)$ в падающую для различных средних размеров зерен керамики

цов – 2,5 МГц, что с учетом высших гармоник сравнимо с диапазоном рабочих частот, и потери с увеличением напряженности поля будут расти. Таким образом, полевая зависимость $\text{tg } \delta$ определяется, с одной стороны, величиной зерна керамики, а с другой – тол-

щиной образца. Вот почему она может иметь как возрастающий, так и падающий характер.

Конструктивно конденсатор выполнен на основе стержня диаметром и толщиной 10 мм без влагозащитного покрытия, поскольку он предназначен для работы в электроизолирующей жидкости. Характеристики конденсаторов приведены в таблице.

Характеристики конденсаторов на частоте 60 МГц (номинальное напряжение постоянного тока – 20 кВ)

Материал диэлектрика	$C_{\text{ном}}$, пФ	Коэффициент управляемости при $E = 2 \text{ кВ/мм}$	$\text{tg } \delta$, при $E =$		Коэффициент эффективности
			0	2 кВ/мм	
Техническое сырье	220±20%	1,67	0,0048	0,0034	16500
Алюксидное сырье	390±20%	3,00	0,0058	0,0025	91000

Технология изготовления конденсаторов принципиально не отличается от принятой в промышленности. Однако, чтобы получить падающую полевую зависимость диэлектрических потерь, все технологические режимы должны быть оптимизированы во избежание возникновения крупнозернистой структуры черепка керамики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вербичкая Т.Н. Титанат бария. – М.: Наука, 1973, с.171–179.
2. Сегнетоэлектрики в технике СВЧ/ Под ред. О.Г.Вендика.– М.: Сов. радио, 1979.– 271 с.
3. Вендик О.Г., Мироненко И.Г., Тер-Мартirosян Л.Т. – Изв. АН СССР. Сер. Физика, 1987, т.51, №10, с.1748–1752.
4. Ротенберг Б.А. Керамические конденсаторные диэлектрики. – Санкт-Петербург: Гириконд, 2000.– 246 с.
5. Голубко Н.В., Яновская М.И., Голубко Л.А. и др. – Известия РАН. Сер. Неорг. матер., 1999, т.35, №4, с.475–481.
6. Ротенберг Б.А., Листошина М.Б., Тесленко С.П., Файнгольд Р.Г. – Международная научно-техническая конференция по физике диэлектриков "Диэлектрики 97": Тез. докладов. Т.2.– Санкт-Петербург, 1997, с.176–177.
7. Jih Wei Liou, Bi-Shiou Chiou. – Jpn. Journ. Appl. Phys., 1997, v.36, p.1, №7A, p.4359.
8. Вендик О.Г., Дедык А.И. и др. – ФТТ, 1980, т.22, с.1692.
9. Гольцман Б.М., Дедык А.И., Леманов В.В. и др. – ФТТ, 1997, т.38, с.2493.

Пластмассовые ИС

Еще одна подвижка

День, когда можно будет "скатать" свой компьютер и положить его в карман вместе с носовым платком, все приблизится. Новый шаг в этом направлении сделали ученые IBM, вырастившие тонкие пленки "пластмассового" материала – пентасена – с кристаллическими зернами, в 20–100 раз превосходящими по своим размерам зерна ранее выращенных полимерных пленок. При этом по электрическим характеристикам полученные пленки оказались пригодными для построения электронных приборов.

Для выращивания и обработки неорганических материалов сегодня успешно применяются результаты, достигнутые в области материаловедения. Но до сих пор специалисты не могут использовать классические теории зародышеобразования и роста для объяснения свойств органических субстанций. Ученые IBM увязали процессы, происходящие в органических материалах, с данными исследований неорганических материалов. Это и позволило с помощью "дружественной" техники вырастить кристаллы размером в несколько десятков миллиметров. Конечно, это еще очень небольшие кристаллы, но их площадь достаточна для изготовления не только транзисторов, но и простейших ИС. Сегодня существуют и другие способы получения монокристаллов полимеров достаточно больших размеров. Так, специалисты Bell Labs сумели в результате пя-

тилетних исследований получить достаточно большие зерна с хорошими электрическими характеристиками. Но разработанный метод выращивания совершенно несовместим с процессом химического осаждения из паровой фазы, широко применяемым в микроэлектронике.

Своим успехом ученые IBM во многом обязаны обнаружению эффекта прилипания молекул пентасена к дефектам поверхности кремниевой подложки, на которой выращивается пленка, что ведет к неупорядоченному росту зерен слишком малых размеров для изготовления активных приборов. Этот эффект удалось выявить на высококачественных снимках молекул пентасена на ранних этапах роста, полученных с помощью фотоэлектронной эмиссионной микроскопии.

Для обеспечения роста достаточно больших зерен был применен "молекулярный буфер" – пленка молекул циклоhexена, наносимая на кремниевую подложку и закрывающая "липкие" области поверхности.

Работа ученых IBM имеет важное значение и для развития молекулярной электроники.

Semiconductor International, 2001, Sept.