

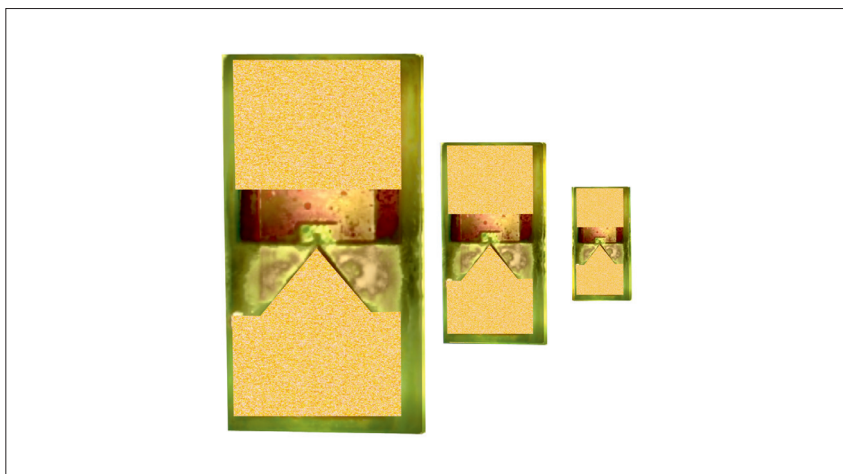
**АНАТОЛИЙ ФИРСЕНКОВ**, генеральный директор, ОАО «Завод Магнетон», [secretar@magneton.ru](mailto:secretar@magneton.ru),  
**ИГОРЬ МИРОНЕНКО**, д. т. н., профессор, СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), [aai2@yandex.ru](mailto:aai2@yandex.ru),  
**АРКАДИЙ ИВАНОВ**, д. т. н., профессор, заместитель генерального директора по инновационной деятельности,  
ОАО «Завод Магнетон», СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), [aai2@yandex.ru](mailto:aai2@yandex.ru),  
**ДМИТРИЙ ВЕЛЬКИН**, начальник ПТЦ 11, ОАО «Завод Магнетон», [secretar@magneton.ru](mailto:secretar@magneton.ru)

# ТЕМПЕРАТУРОСТАБИЛЬНЫЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЛЕНКИ И ВАРИКОНДЫ НА ИХ ОСНОВЕ ДЛЯ УСТРОЙСТВ СВЧ

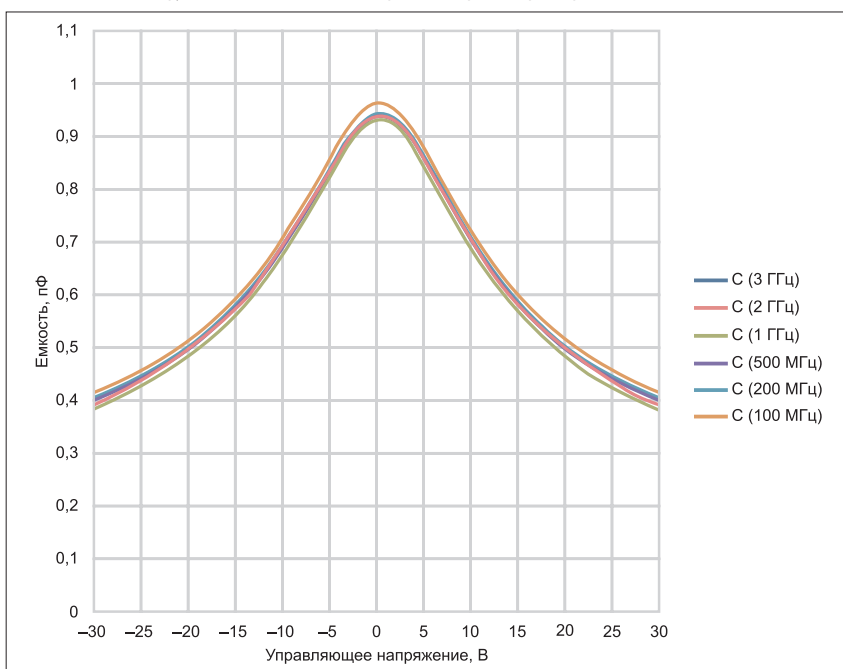
Современная твердотельная элементная база позволяет генерировать, усиливать и обрабатывать сигнал в широком частотном интервале, включая миллиметровый диапазон длин волн. В связи с этим возрастает необходимость разработки устройств управления амплитудой и фазой электромагнитных колебаний этого диапазона.

Устройства с управляемыми АЧХ и ФЧХ базируются на материалах, электрофизические свойства которых – диэлектрическая проницаемость, магнитная проницаемость, проводимость – изменяются под воздействием управляющих электрических, магнитных полей или тока. К таким материалам относятся полупроводники, ферриты, сегнетоэлектрики.

Сегнетоэлектрические материалы, которых на сегодня синтезировано уже более трехсот, обладают нелинейными свойствами по отношению к управляющему электрическому полю. Это сближает их с ферритами по принципу получения управляемого фазового сдвига – изменению фазовой скорости электромагнитной волны в волноведущей структуре при изменении магнитной или диэлектрической проницаемости. Из всего многообразия сегнетоэлектрических материалов в СВЧ-диапазоне могут быть использованы только сегнетоэлектрики на основе твердых растворов  $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$  (BSTO) и  $SrTiO_3$ , чья диэлектрическая проницаемость по отношению к полю СВЧ изменяется в два-три раза при подаче внешнего электрического поля напряженностью 20–35 В/мкм и обладающих малыми потерями в сверхвысокочастотном диапазоне. Этот эффект сохраняется в широком диапазоне частот. Относительная диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков типа BSTO находится в диапазоне  $10^3$ . Следовательно, замедление электромагнитных волн в такой среде исключительно велико и поэтому сегнетоэлектрики могут быть использованы только в виде пленок толщиной порядка 1 мкм, нанесенных на диэлектрическую подложку.



▲ Рис. 1. Конструктивное SMD-исполнение варикондов трех типоразмеров: 0603, 0402, 0201



▲ Рис. 2. Зависимость емкости вариконда от управляющего напряжения

В свою очередь, диэлектрическая структура «сегнетоэлектрическая пленка – диэлектрическая подложка» представляет собой волноведущую структуру поверхностных волн, замедление которых, с одной стороны, достаточно для построения малогабаритных устройств, а с другой – предоставляет возможность управления их фазовой скоростью за счет изменения диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрической пленки. Управление диэлектрической проницаемостью технически осуществлено лишь с помощью электродов, нанесенных на поверхность сегнетоэлектрической пленки, образующих планарную структуру емкостью не более нескольких десятков пикофарад, что при управляющем напряжении порядка 100 В требует затрат энергии, не превосходящих десятков микроджоулей. Интенсивный отвод тепла из тонкого слоя сегнетоэлектрика через диэлектрическую подложку с высокой теплопроводностью позволяет проектировать и изготавливать устройства с высоким уровнем передаваемой мощности. Таким образом, на основе структур, содержащих сегнетоэлектрическую пленку, возможно создание управляемых СВЧ-устройств, таких как фазовращатели, фильтры, антенны с электронной перестройкой луча ДН, и других, обладающих высоким быстродействием, низким потреблением энергии по цепям управления, имеющих малые массогабаритные характеристики по сравнению с устройствами на ферритах и полупроводниках. Однако основным сдерживающим фактором широкого распространения сегнетоэлектриков становится зависимость диэлектрической проницаемости от температуры и технологические проблемы их изготовления.

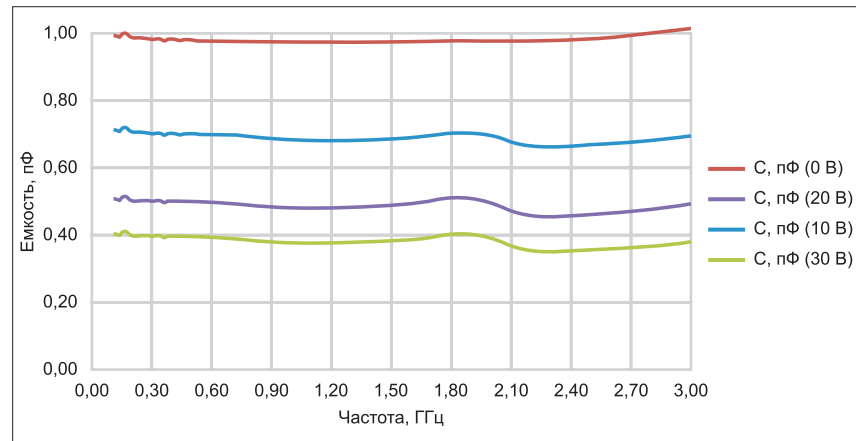
В 2012 году в ОАО «Завод Магнетон» совместно с СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) была впервые в мире разработана технология получения многослойных нанокompозитных сегнетоэлектрических пленок (МНСЭП) на подложках различной физической природы, обладающих высокой температурной стабильностью своих электрофизических параметров. На основе структур «диэлектрическая подложка – МНСЭП» начат выпуск варикондов, работающих при уровнях управляющего напряжения 20 и 200 В. Электрофизические параметры варикондов в широком температурном интервале ( $-60 \dots +85 \text{ }^\circ\text{C}$ ) изменяются не более чем на  $\pm 5\%$ . На рис. 1 представлена фотография, иллюстрирующая конструктивное SMD-исполнение варикондов трех типоразмеров: 0603, 0402, 0201.

Изменение емкости вариконда от управляющего напряжения характеризуется коэффициентом управления  $K_U = C(0)/C(U)$ , где  $C(0)$  — началь-

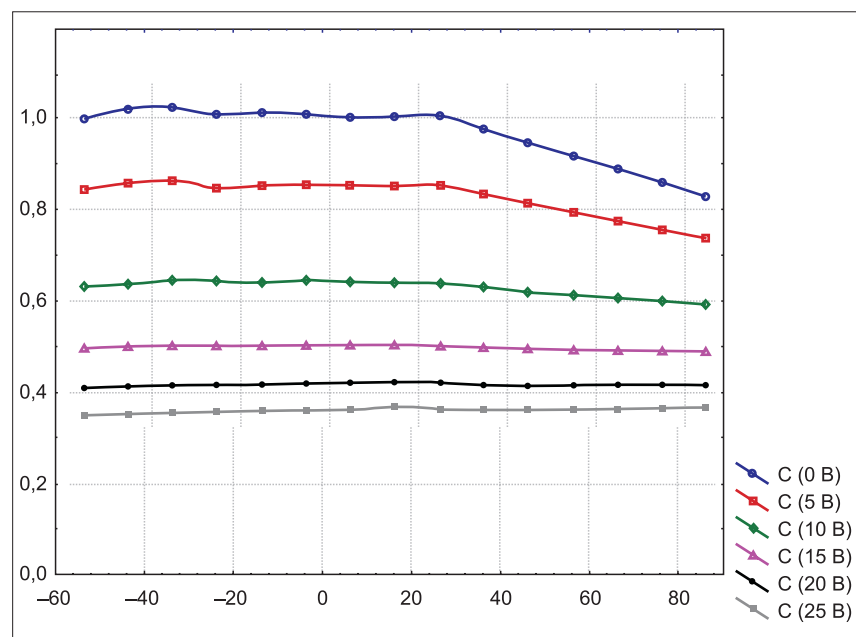
ная емкость вариконда при  $U_{\text{упр}} = 0 \text{ В}$ ,  $C(U)$  — емкость при напряжении  $U$ , В. На рис. 2 представлена характеристика изменения емкости вариконда от управляющего напряжения  $C(U_{\text{упр}})$  в различных частотных точках. Из графика видно, что при напряжении  $U_{\text{упр}} = 20 \text{ В}$  ко-

эффициент управления  $K_U \geq 2$  и сама зависимость от величины напряжения практически линейна.

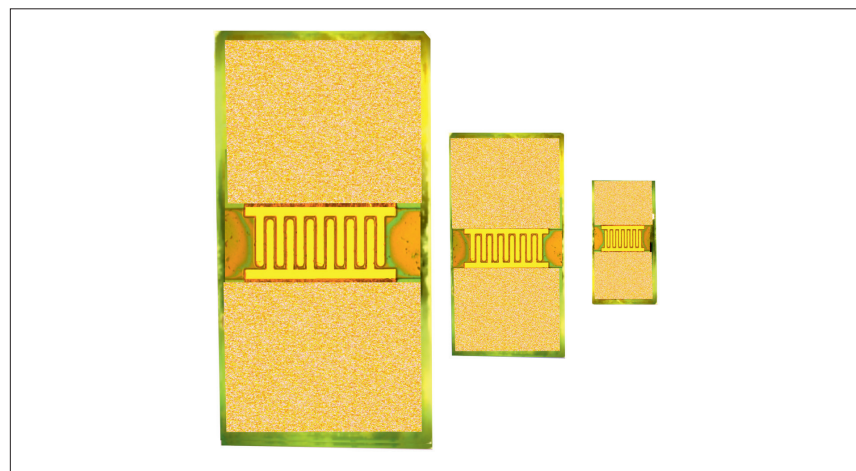
Зависимости емкости вариконда в широком частотном интервале при различных управляющих напряжениях  $C(f)$  изображены на рис. 3.



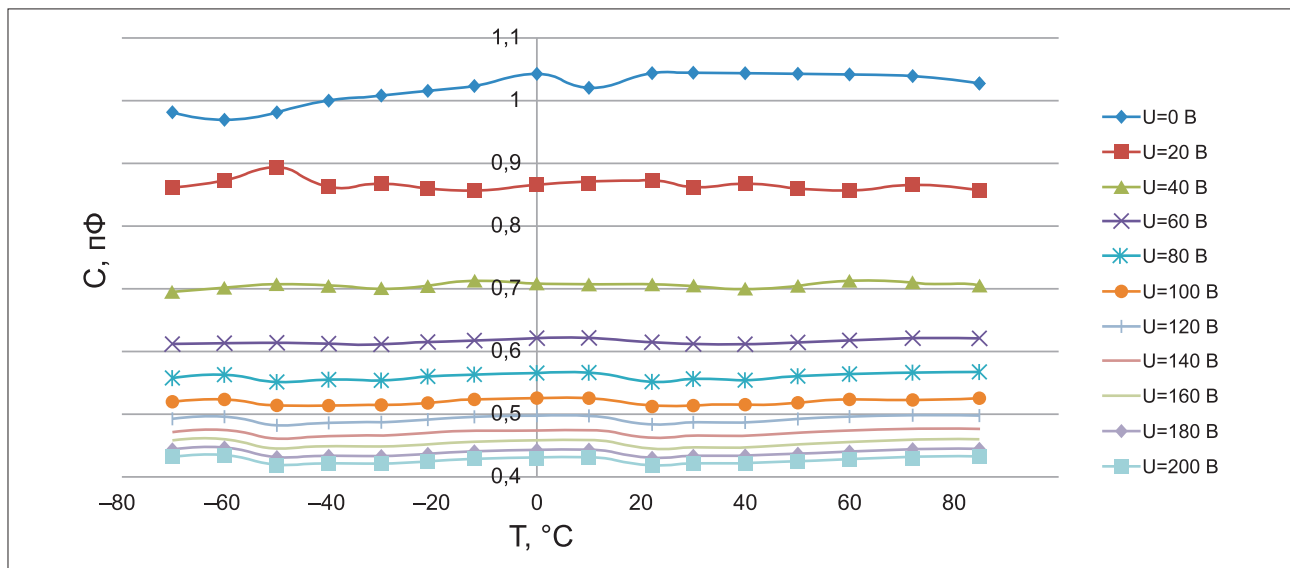
▲ Рис. 3. Зависимость емкости вариконда от частоты



▲ Рис. 4. Зависимость емкости вариконда от температуры



▲ Рис. 5. Планарные конденсаторы на МНСЭП со встречно-штыревой структурой электродов в SMD-исполнении трех типоразмеров: 0603, 0402, 0201



▲ Рис. 6. Зависимость емкости вариконда от температуры для различных значений управляющего напряжения

Имеющаяся малая частотная зависимость емкости варикондов обусловлена влиянием индуктивности контактных площадок.

Экспериментальные зависимости емкости от управляющего напряжения и температуры рис. 4, показывают, что в диапазоне  $-60...+20$  °C изменение емкости менее 0,5%, а в интервале  $+20...+85$  °C не превышает 9%, также можно видеть линейризацию характеристик с увеличением величины управляющего напряжения.

Планарные конденсаторы на МНСЭП со встречно-штыревой структурой электродов в SMD-исполнении трех типоразмеров: 0603, 0402, 0201 показаны на рис. 5. Напряжение 200 В обеспечива-

ет изменение емкости конденсатора более двух раз.

Зависимость емкости планарного вариконда от изменения температуры для различных значений управляющего напряжения показана на рис. 6.

Добротность варикондов на частоте 3 ГГц не менее 40. Таким образом, применение варикондов на МНСЭП с малым и высоким уровнем управляющего напряжения позволяет проектировать управляемые устройства с электрически перестраиваемыми АЧХ и ФЧХ, работающие в широком температурном и частотном интервалах.

ОАО «Завод Магнетон» для разработчиков собственной ЭКБ и устройств

с электрически перестраиваемыми характеристиками (фильтры, фазовращатели, линии задержки, СВЧ-ключи и т.д.), предлагает сапфировые подложки размером  $30 \times 48$  мм со сформированной структурой типов: «диэлектрическая подложка – МНСЭП», «диэлектрическая подложка – Pt-электрод – МНСЭП», «диэлектрическая подложка – Pt-электрод – МНСЭП – Cu-электрод», «диэлектрическая подложка – МНСЭП – Cu-электрод».

На основе созданных МНСЭП-пленок на предприятии выполнен ряд НИОКР по разработке фазовращателей и фильтров с плавным управлением их характеристиками работающими в СВЧ- и КВЧ-диапазонах длин волн. ●