

Александр АВРУТИН

tigrabig@mail.ru

Виктор ДРАЗНИН

vdraznin@mail.ru

Галина ЛАВРИК

glavrik@yandex.ru

Валерий МАРАХОНОВ

8@giricond.ru

Валентина ФИЛИПОВА

Тонкопленочные вариконды — новые управляемые конденсаторы

Вариконды — это нелинейные конденсаторы, емкость которых зависит от приложенного напряжения.

Рабочим диэлектриком варикондов является сегнетоэлектрический материал, нелинейность диэлектрической проницаемости которого лежит в основе принципа работы вариконда.

Вариконды как дискретные элементы низкочастотной радиоаппаратуры появились еще в 50-е годы прошлого века [1]. Нелинейные свойства варикондов позволяют очертить возможные области их применения в радиоаппаратуре (в электронных устройствах техники связи, радио, телевидения, радиолокации, радиоретрансляции, измерительной технике) в качестве управляемых элементов для выполнения следующих функций:

1. Настройка фильтров и резонансных контуров генераторов, усилителей, линий задержки и других управляющих цепей.
2. Регулировка параметров сигналов в радиоэлектронных устройствах (фаза, частота, коэффициент передачи).
3. Автоматическое регулирование (стабилизация) параметров радиосигналов.
4. Преобразование напряжения в частоту, фазу, коэффициент передачи; соответственно, кодирование информации.
5. Модуляция параметров радиосигналов.

В настоящее время практический интерес к применению варикондов связан с разработками в области СВЧ-техники, в первую очередь систем радиолокации на основе фазированных антенных решеток (ФАР).

Основной функциональный элемент ФАР — это фазовращатель, устройство для управления фазой сигнала, излучаемого единичным модулем ФАР. Способность фазовращателя управлять фазой сигнала обеспечивается наличием в его составе электронных компонентов (полупроводниковых, ферромагнитных или сегнетоэлектрических), параметры которых изменяются под воздействием приложенного к ним магнитного или электрического поля (или под воздействием протекающего через них тока).

ФАР включает в себя большое количество (от сотен до десятков тысяч) однотипных единичных управляемых модулей, СВЧ-излучение которых характеризуется фазой

сигнала, задаваемой входящим в состав модуля фазовращателем. А значит, фазовращатели должны обладать малой мощностью в цепях управления, высоким быстродействием, высокой надежностью и умеренной стоимостью изготовления при массовом производстве.

Сейчас фазовращатели реализуются главным образом на полупроводниковых приборах (*p-i-n*-диодах, варикапах, полевых транзисторах) и на основе намагниченного феррита, при этом ни один из названных вариантов не обладает сочетанием всех требуемых свойств. Поэтому внимание разработчиков ФАР при создании фазовращателей привлек новый СВЧ-элемент — управляемый напряжением конденсатор на основе сегнетоэлектрического материала, или вариконд (в западной литературе именуемый ферроэлектрическим варактором) [2].

Целесообразность применения варикондов при разработке фазовращателей для ФАР на частоту 3–10 ГГц обосновывается следующими факторами [3]:

- Изменение емкости вариконда достигается приложением управляющего напряжения при ничтожно малом токе. Благодаря этому мощность управляющих цепей оказывается на один-два порядка меньше, чем в случае применения ферритовых управляющих устройств или устройств на основе полупроводниковых приборов.
- Достигаются высокий уровень СВЧ-мощности и быстродействие.
- При достаточной добротности вариконда следует ожидать высокого значения показателя качества фазовращателя, определяемого как отношение сдвига фазы к потерям СВЧ-мощности в фазовращателе.
- Простота конструкции и возможность использования интегрально-групповой технологии при изготовлении варикондов способствует реализации низкой стоимости устройств СВЧ-электроники.

В 1980-е годы в опытном производстве изготавливались вариконды ВК-7 (на основе одноименного сегнетокерамического материала), предназначенные для использования на частоте до единиц ГГц. Однако уровень эксплуатационных и массо-габаритных характеристик не позволяет использовать их в разработках современных СВЧ-устройств,

что связано с недостатками принятой для получения рабочего диэлектрика керамической технологии.

Возможность применения современных варикондов в СВЧ-устройствах обеспечена принципиальным повышением уровня их эксплуатационных и массо-габаритных характеристик благодаря замене керамической технологии изготовления варикондов на тонкопленочную.

Наиболее перспективными СЭ-материалами для использования в качестве рабочего диэлектрика вариконда являются твердые растворы $Ba_xSr_{1-x}TiO_3$ (БСТО). В литературе встречаются публикации, посвященные свойствам этого композита для различных соотношений Ва и Sr.

Основным требованием к электрическим параметрам сегнетоэлектрического материала является оптимальное сочетание величины диэлектрической проницаемости (ϵ) и повышенной управляемости с малыми диэлектрическими потерями в микроволновом диапазоне. Указанные параметры должны реализовываться в тонких пленках сегнетоэлектриков, работающих при повышенных электрических полях, что требует оптимизации состава диэлектрика, технологии получения пленок и конструкции вариконда.

Наиболее используемые методы нанесения пленок БСТО — высокочастотное магнетронное распыление керамических мишеней требуемого состава и осаждение пленок методом разложения подходящих металлоорганических соединений.

Как всякий электрический конденсатор, вариконд характеризуется емкостью, тангенсом угла потерь (измеряемым обычно на низкой частоте для удобства контроля при технологических проверках), а также сопротивлением изоляции, электрической прочностью и температурной стабильностью. Однако для использования в качестве управляемого элемента СВЧ-цепей важнейшими его характеристиками являются коэффициент управления при заданном управляющем напряжении и добротность на СВЧ.

Коэффициент управления K_u характеризует управляемость емкости вариконда и определяется как отношение величины емкости $C(0)$, измеренной при нулевом управля-

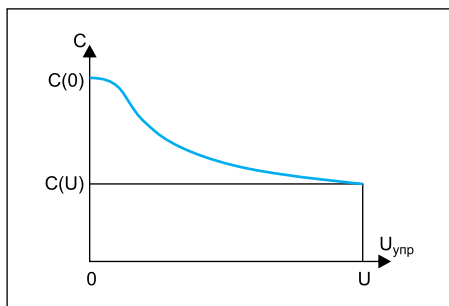


Рис. 1. Характер зависимости емкости вариконда от управляющего напряжения

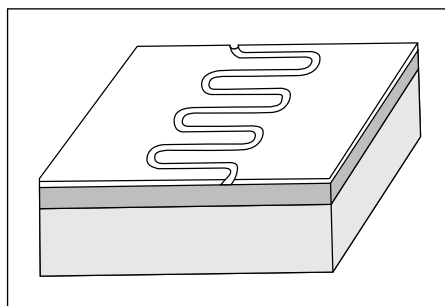


Рис. 2. Эскиз вариконда планарной конструкции

щего напряжения. (Приемлемый уровень коэффициента управления при использовании пленок БСТО, осажденных методом высокочастотного магнетронного распыления, достигается при средней напряженности поля 30–45 В/мкм.)

Практически реализуемые конструкции более сложны, так как должны обеспечить как технологические требования (например, сочетаемость материалов в процессе изготовления), так и эксплуатационные (надежность, способность к монтажу в аппаратуру).

На рис. 3 приведен пример структуры слоев планарного вариконда по [4, 5].

Конструкция тонкопленочного вариконда двухэлектродной конструкции показана на рис. 4. Такие вариконды могут быть, например, встроены в разрыв микрополосковой линии.

Эти вариконды предназначены для автоматизированного поверхностного монтажа (соответствуют типоразмеру 0603) с упаковкой в трехслойную перфорированную бумажную ленту.

Параметры варикондов:

- Диапазон номинальной емкости: 1–3,3 пФ.
- Добротность на частоте 4 ГГц: не менее 25.
- Управляющее напряжение: 220 В.
- Коэффициент управления: не менее 1,8.

На рис. 5 показана печатная плата для проведения испытаний, на которой установлены вариконды с помощью автоматизированного монтажа.

Вариконды могут иметь и трехэлектродную конструкцию, предназначенную, например, для соединения микрополосковой линии с «земляной» плоскостью. На рис. 6 представлен внешний вид вариконда КН1-7 АЖЯР.673553.001 ТУ.

Существенное свойство планарной конструкции варикондов состоит в ограниченности реализуемого диапазона емкости. Правда, для применения в СВЧ-устройствах большие номиналы емкости варикондов, как правило, и не требуются. Вариконды планарной конструкции можно с успехом применять не только при создании фазовращателей, но и в управляемых фильтрах и линиях задержки.

щем напряжении, к величине емкости $C(U)$, измеренной при заданном управляющем напряжении $U_{упр} = U$. Таким образом:

$$K_y = C(0)/C(U).$$

Как видно на рис. 1, поясняющем характер зависимости емкости вариконда от управляющего напряжения, коэффициент управления $K_y > 1$.

Добротность вариконда на СВЧ есть величина, обратная тангенсу угла потерь при соответствующей частоте (она не коррелирует с величиной тангенса угла потерь, измеренного при низких значениях частоты), характеризующая потери СВЧ-энергии в вариконде.

Следует отметить, что управляющее напряжение — это параметр, который не всегда требует минимизации. Например, в фазовращателях для передающих ФАР высокое зна-

чение управляющего напряжения позволяет уменьшить модуляцию фазы излучаемого сигнала.

По конструкции тонкопленочные вариконды бывают двух типов: планарные (электроды вариконда расположены в одной плоскости) и «вертикальной» конструкции (с расположением электродов типа «сэндвич»); по каждому типу конструкции существует обширная патентная литература.

Общее представление о планарной конструкции вариконда дает рис. 2.

Принципиально важные элементы этой конструкции: диэлектрическая подложка, на которую нанесен слой рабочего диэлектрика из сегнетоэлектрического материала, и электроды, разделенные зазором.

Выбор величины рабочего зазора (обычно несколько мкм) связан как с конструктивно-технологическими нормами производства, так и с требованиями по величине управля-

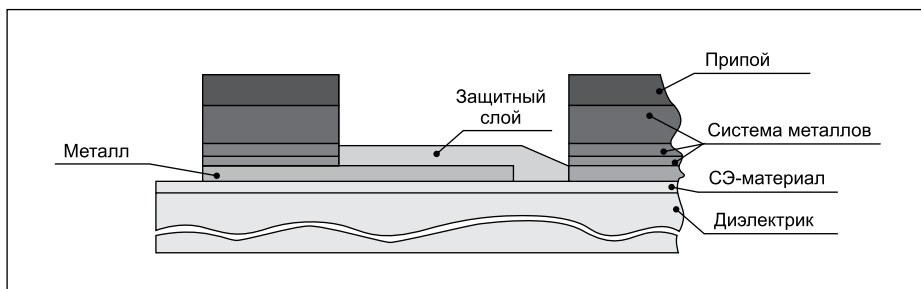


Рис. 3. Пример структуры слоев планарного вариконда

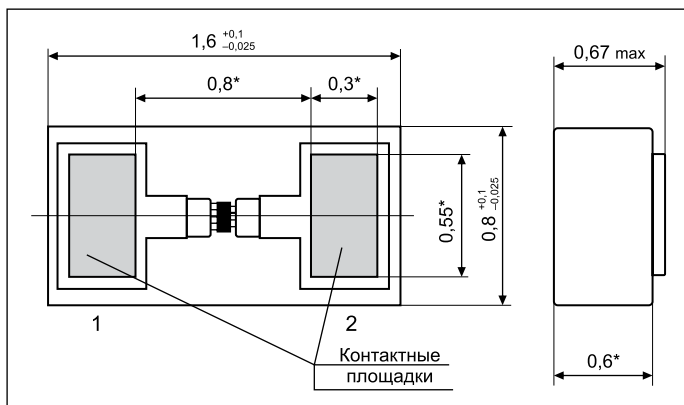


Рис. 4. Конструкция тонкопленочного вариконда

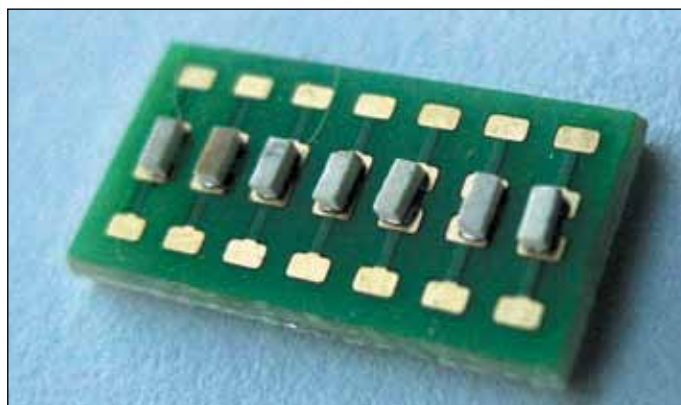


Рис. 5. Вариконды после автоматизированного монтажа на печатной плате

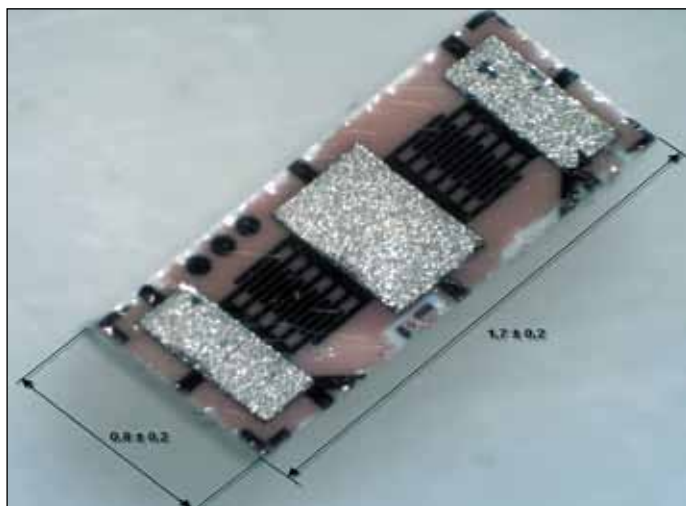


Рис. 6. Внешний вид вариконда КН1-7

Применение планарных варикондов особенно целесообразно для устройств высокой СВЧ-мощности, где повышенное постоянное или импульсное напряжение управления (сотни вольт) не является препятствием для их использования. Однако для применения в мало-сигнальных устройствах необходимо радикальное снижение управляющих напряжений до уровня, обычно используемого в полупроводниковой электронике (десятки вольт). В рамках планарной конструкции это ведет к серьезным технологическим и конструктивным проблемам, связанным с получением характерных топологических размеров менее 1 мкм.

Одним из путей решения задачи обеспечения технологичности является реализация «вертикальных» структур типа «металл – диэлектрик – металл» (МДМ) на основе тонкой СЭ-пленки, в которых уменьшение толщины СЭ-пленки (менее 1 мкм) позволяет получить необходимый коэффициент управления ($K_y \geq 2$) при напряжении менее 40 В.

На варикондах «вертикальной» конструкции можно получить значительно большие номиналы емкости.

На рис. 7 приведен эскиз устройства «вертикального» вариконда.

Слой СЭ-материала БСТО наносится методом вакуумного радиочастотного распыления материала мишени в кислородсодержащей атмосфере при высокой (до +900 °С) температуре подложки, на которую производится осаждение распыляемого материала. При другом способе нанесения материалов типа БСТО — разложением металлоорганических соединений — для обеспечения должной кристаллической структуры и свойств осаждаемых слоев производится операция отжига при температуре порядка +1000 °С. Так как до нанесения слоя рабочего диэлектрика на подложке уже должен быть сформирован нижний электрод вариконда, то материал нижнего электрода должен быть стоек к воздействию высокой температуры при осаждении слоя БСТО или отжига, а также не должен вступать в химическое взаимодействие с осаждаемым слоем. Известно [6], что этому требованию соответствуют некоторые тугоплавкие благородные металлы, например платина.

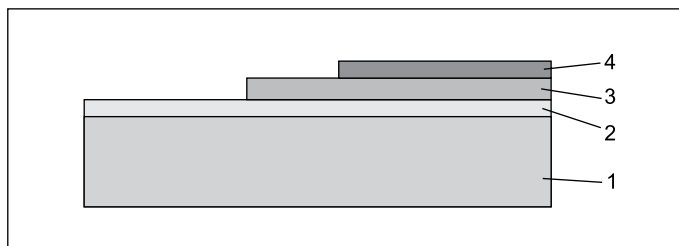


Рис. 7. Эскиз устройства «вертикального» вариконда: 1 — подложка; 2 — нижний электрод; 3 — диэлектрик; 4 — верхний электрод

Основные недостатки платины как металла для нижнего электрода вариконда — это трудности обеспечения адгезии к подложке и высокая стоимость.

Отказаться от использования платины в процессе создания пленочного вариконда и обеспечить при этом приемлемые значения параметров варикондов можно, если, например, применить в качестве материала нижнего электрода высоколегированный кремний. В этом случае пластина из монокристаллического кремния используется также в качестве подложки пленочного вариконда. Кремний — тугоплавкий материал, он способен выдерживать высокую температуру в процессе магнетронного распыления и осаждения слоя материала БСТО. Степень взаимодействия кремния с материалом БСТО в процессе осаждения слоя в кислородной атмосфере или при отжиге слоя, полученного разложением металлоорганики, крайне незначительна, а проводимость кремния, особенно при высокой степени легирования, может быть достаточной для использования пластины кремния в качестве нижнего электрода вариконда.

Такие вариконды «вертикальной» конструкции (мы имеем в виду использование в них пластины кремния в качестве нижнего электрода вариконда) можно назвать МДП-варикондами (металл – диэлектрик – полупроводник, МДП).

На рис. 8 показан эскиз конструкции тонкопленочного МДП-вариконда, предназначенного для поверхностного монтажа [7]. В данном случае вариконд представляет собой последовательное включение двух одинаковых структур, соединенных между собой слоем высоколегированного кремния. Для уменьшения электрического сопротивления нижнего электрода такая структура дополнительно содержит слой металла, который служит для омического контакта с кремнием (например, вожженный слой алюминия).

В МДП-варикондах толщина рабочего диэлектрика может быть менее 1 мкм, что обеспечивает высокое значение удельной поверхностной емкости слоя из материала БСТО (тысячи пФ/мм²). При этом можно ожидать, что в типоразмере 0603 предельная номинальная емкость составит 1000 пФ, а в типоразмере 0402 — 300 пФ. Предельная рабочая частота, по предварительным расчетам, составит около 40 МГц.

Коэффициент управления около 2 может быть получен при малых значениях управляющего напряжения (20–40 В).

В заключение хочется выразить надежду на то, что технический потенциал варикондов окажется востребованным широким кругом специалистов не только в СВЧ-технике, но и в сфере РЭА в целом. ■

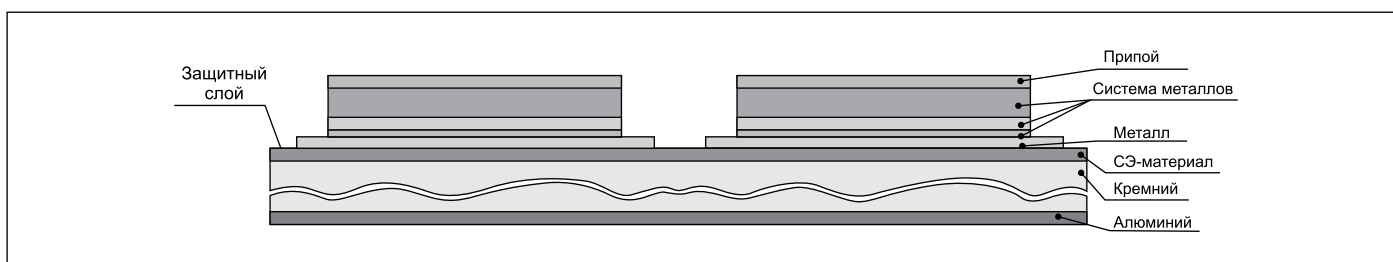


Рис. 8. Тонкопленочный МДП-вариконд для поверхностного монтажа

Литература

1. Вербицкая Т. Н. Вариконды. М.-Л.: ГЭИ, 1958.
2. Вендик О. Г., Парнес М. Д. Антенны с электрическим сканированием. Введение в теорию. Под ред. Л. Д. Бахраха. М.: Сайнс-пресс, 2002.
3. Парнес М. Д. Высокотехнологичные антенные решетки СВЧ на основе многослойных плат для радаров и систем связи. Автореферат дисс. наиск. уч. ст. д-ра техн. наук. СПб., 2011.
4. Аврутин А. Д., Дразнин В. Д., Лаврик Г. П., Филиппова В. Ф. Патент РФ на полезную модель № 120509. Пленочный планарный вариконд (приоритет 14.12.2011 г., заявка № 2011151234, опубл. 20.09.2012 г., бюл. № 26).
5. Аврутин А. Д., Дразнин В. Д., Лаврик Г. П., Филиппова В. Ф. Патент РФ на изобретение № 2479879. Пленочный планарный вариконд (приоритет 14.12.2011 г., заявка № 2011151261/07, опубл. 20.04.2013 г., бюл. № 11).
6. Sindo S., et al. US Patent № 5449933. Ferroelectric thin film element (заявлен: 30.03.1993 г., выдан: 12.09.1995 г.).
7. Аврутин А. Д., Дразнин В. Д., Лаврик Г. П., Марахонов В. М., Филиппова В. Ф. Заявка на полезную модель № 2013110123/28 (015001). Пленочный вариконд. (Подана 06.03.2013 г.)