

# Радиочастотные элементы и устройства на основе компонентов микросистемной техники

Н. НЕЧАЕВА, канд. техн. наук, г. Москва

Радиочастотные элементы, изготовленные по технологии МСТ, всё шире применяют в электронной аппаратуре. Они позволяют уменьшить массогабаритные показатели и расширить рабочую частоту вплоть до субмиллиметрового диапазона. Примеры таких радиоэлементов — сверхминиатюрные переключатели СВЧ сигналов с малыми потерями и высокой линейностью, конденсаторы переменной ёмкости, катушки индуктивности, резонаторы, генераторы, фильтры, элементы антенных решёток и многие другие.

Устройства на основе МСТ компонентов, выпускаемые серийно, — переключатели сигналов. По принципу работы различают два основных типа переключателей (коммутаторов): контакт-

которых второй контакт подключает к размыкаемой линии резистор с сопротивлением, равным её волновому сопротивлению. Быстродействие переключателя — единицы и десятки микросекунд, гарантированное число срабатываний при токе через контакты 2 мА — не менее  $10^{10}$ , при токе 20 мА — 1000 и

ходимо использовать магнитные материалы [4]. Электротермический способ требует применения материалов с различными значениями коэффициента теплового расширения. В таблице [2] представлены основные технические характеристики некоторых серийно выпускаемых МСТ переключателей.

Конструкция ёмкостного шунтирующего коммутатора [5] показана на рис. 4. Он предназначен для работы на частоте более нескольких гигагерц, его основа — гибкая алюминиевая мембрана толщиной 0,4 мкм с перфорацией. Мембрана размещена над копланарной линией передачи. В исходном состоянии ёмкость между ней и центральным отрезком линии мала и затухание сигнала невелико (на частоте 35 ГГц не превышает 0,5 дБ). При подаче управляющего напряжения от 30 до 50 В

Переключатель, фирма-изготовитель	Диапазон частот, ГГц	Потери в замкнутом состоянии на частоте 1 ГГц, дБ	Затухание в разомкнутом состоянии на частоте 1 ГГц, дБ	Время включения/выключения, мкс	Управляющее напряжение, В	Габариты, мм
RMSW220HP Radiant MEMS	0...40	0,25	35	10/2	90	0,65×1,4×1,45
2SMES-01 Omron	0...15	0,15	50	100/100	34	1,85×3×5,2

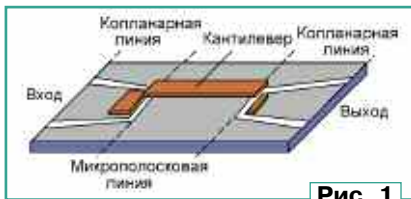


Рис. 1



Рис. 2

ные и ёмкостные. В контактных коммутаторах очень часто применяют кантилевер, о котором было рассказано в предыдущей статье [1]. Разработано несколько конструкций на его основе. В одной из них, работоспособной как в диапазоне СВЧ, так и на постоянном токе (рис. 1) [2], кантилевер входит в состав микрополосковой линии передачи, а к ней с двух сторон подключены копланарные линии. Если на кантилевер подать постоянное напряжение, вследствие электростатического взаимодействия он согнётся и соединит копланарные линии.

Очень похожий коммутатор, но с отдельным управляющим электродом, который расположен на подложке под кантилевером, показан на рис. 2 [2]. Конструкция ещё одного аналогичного устройства — на рис. 3 [3]. При подаче управляющего напряжения подвижная пластина кантилевера, перемещаясь, контактной площадкой замыкает неподвижные контакты на подложке (материал контактов — золото). Диаметр неподвижных контактов — около 2 мкм при толщине 0,3 мкм. Уменьшение размеров кантилевера приводит к расширению полосы рабочих частот и повышению быстродействия, однако при этом снижается максимально допустимый ток через контакты. Для обеспечения стабильного значения КСВ применяют комбинированные коммутаторы, в

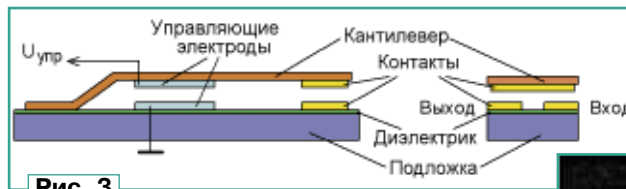


Рис. 3

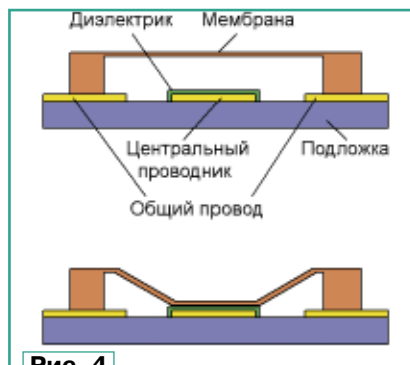


Рис. 4

мембрана прогибается и ложится на слой диэлектрика, нанесённого на поверхность линии передачи. При этом ёмкость линии относительно общего провода возрастает, а затухание сигнала увеличивается до 35 дБ на той же частоте. Разработаны переключатели, у которых в качестве подвижного элемента применена микроскопическая капля ртути [2].

МСТ коммутаторы, по сравнению с коммутаторами на диодах или арсенид-галлиевых полевых транзисторах, имеют меньшее затухание в замкнутом состоянии и боль-

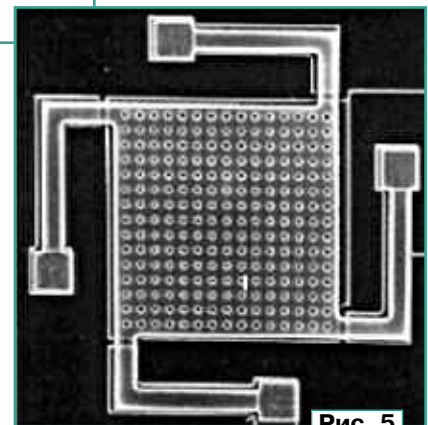


Рис. 5

10 — при 300 мА. Током более 1 А коммутатор разрушается.

Для управления такими переключателями применяют различные способы. Электростатический обеспечивает самую простую конструкцию, но управляющее напряжение может достигать несколько десятков вольт. При магнитном управлении напряжение существенно меньше, но в конструкции необ-

шую развязку в разомкнутом. Уровень мощности проходящего неискажённого сигнала приблизительно 43 дБмВт, что на 10 дБ больше, чем у транзисторных или диодных ключей. Нелинейные искажения сигнала, проходящего через коммутатор, малы: типовое значение мощности в гипотетической точке на амплитудной характеристике устройства, в которой мощность интермодуля-

ционных искажений третьего порядка равна мощности основного сигнала (в зарубежной литературе её называют точкой пересечения третьего порядка IP3), составляет 70 дБмВт [3].

Ещё один элемент, который можно реализовать на основе технологии МСТ, — конденсатор переменной ёмкости. Используют несколько способов изменения ёмкости, но в подавляющем большинстве применяют электростатическое управление с помощью постоянного напряжения. Поэтому такие элементы можно назвать конденсаторами, управляемыми напряжением (КУН). Они являются аналогами варикапов, но в некоторых случаях обладают лучшими параметрами. В КУН с изменяемым зазором один из электродов подвижен, поскольку закреплён на эластичной подвеске, и при подаче управляющего напряжения приближается или удаляется от неподвижной пластины. Но есть конструкция и с эластичным перфорированным электродом, который имеет возможность прогибаться под действием электростатических сил (рис. 5) [2]. Размеры такого конденсатора — 200×200 мкм, при изменении напряжения от 0 до 5,5 В его ёмкость изменяется в интервале 2,11...2,46 пФ. В КУН с изгибающимися электродами (рис. 6) [6], расстояние между которыми несколько микрометров, при изменении напряжения от 0 до 3,6 В ёмкость меняется от 630 до 900 пФ.

Подвижная встречно-штыревая структура стала основой ещё одной конструкции КУН [2]. Ёмкость регулируется перекрытием элементов гребенчатой структуры (рис. 7). Расстояние между элементами "гребёнки" — несколько микрометров, а ёмкость такого конденсатора изменяется от 1,7 до 12 пФ при изменении напряжения от 0 до 8 В, добротность — несколько десятков, а резонансная частота превышает 5 ГГц. На основе кантилевера предложена конструкция конденсатора переменной ёмкости типа "молния" (рис. 8). Разработана также конструкция КУН типа "бабочка", который состоит из сегментов, принимающих несколько угловых положений. На основе патента [7] компания WiSpry серийно выпускает КУН WSC002L с дискретной перестройкой ёмкости в интервале 0,2...2 пФ с шагом 0,125 пФ. В одном корпусе размещено несколько МСТ конденсаторов ёмкостью от 0,125 до 1 пФ, которые переключаются в соответствии с управляющим кодом. Быстродействие — 50 мкс, добротность на частоте 2 ГГц — не менее 100.

Следует ещё раз отметить, что, в отличие от варикапов и варакторов, такие КУН обладают более высокой линейностью характеристики и способны работать без искажений сигнала при мощности несколько десятков милливатт.

При создании микросхем диапазона СВЧ возникает потребность в высокодобротных катушках индуктивности. "Классические" конструкции монолитных катушек индуктивности, выполнен-

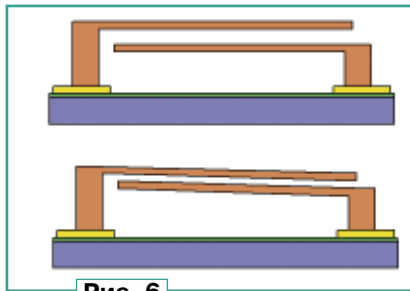


Рис. 6

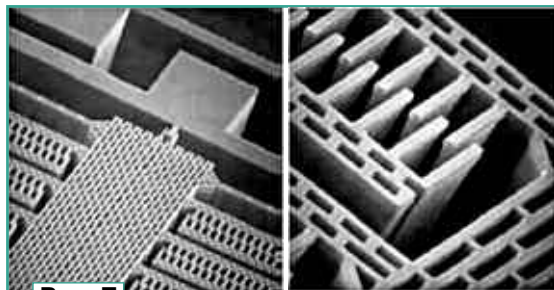


Рис. 7

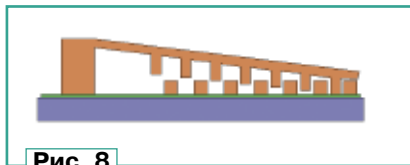


Рис. 8

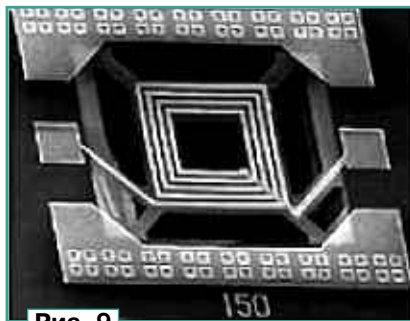


Рис. 9

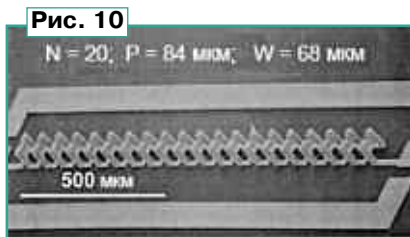


Рис. 10



ные на поверхности полупроводникового материала, не позволяют получить требуемые параметры в основном по причине большой паразитной ёмкости и существенных потерь в подложке.

Части этих недостатков лишены катушки индуктивности в виде объёмных конструкций. Удалением (травлением) подложки под спиральной катушкой индуктивности удалось существенно уменьшить потери и паразитную ёмкость [8]. Такая катушка (рис. 9) на частоте 8 ГГц имеет добротность 30, индуктивность — 10,4 нГн, индуктивность на один виток — 1,48 нГн, собственную резонансную частоту — 10,1 ГГц. Спиральная медная катушка показана на рис. 10 [9], на частоте 8,4 ГГц её индуктивность — 2,4 нГн и добротность — около 25. На основе таких катушек индуктивности и КУН, как на элементах с сосредоточенными параметрами, можно изготовить различные устройства СВЧ диапазона: перестраиваемые фильтры, линии задержки, фазовращатели и т. д.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Нечаева Н.** Компоненты микросистемной техники и устройства на их основе. Актуаторы. — Радио, 2012, № 10, с. 8—11.
2. **Varadan Vijay K., Vinoy K. J., Jose K. A.** RF MEMS and Their Applications. — <<http://eom.pp.ua/books/%D0%A2%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5%D0%9D%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%B8/NONit/engineering/Wiley%20Publishing,%20Inc%20-%20RF%20MEMS%20and%20Their%20Applications.pdf>>.
3. **Белов Л., Житникова М.** Микромеханические компоненты радиочастотного диапазона. — ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес, 2006, № 8, с. 18—25 ([http://www.electronics.ru/files/article\\_pdf/0/article\\_809\\_867.pdf](http://www.electronics.ru/files/article_pdf/0/article_809_867.pdf)).
4. Микромеханический коммутационный элемент, управляемый внешним магнитным полем (MEMS — переключатель) MS1. — <<http://www.rmcp.ir/articles/details/id/19>>.
5. **Oberhammer Joachim.** Novel RF MEMS Switch and Packaging Concepts. — <<http://www.ee.kth.se/php/modules/publications/reports/2004/TRITA-ILA-0401.pdf>>.
6. **Abbaspour-Sani Ebrahim, Nasirzadeh Naser, Dadashzadeh G.** A Novel Structure for MEMS Based Varactors. — <[http://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/august\\_06/P\\_78.pdf](http://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/august_06/P_78.pdf)>.
7. Patent application title: Capacitive Measuring Circuit for Yarn Inspection. — <<http://www.faqs.org/patents/app/20110254567>>.
8. **Richards Randy J. and De Santos Hector J.** MEMS for RF/Microwave Wireless Applications: The Next Wave. — <<http://www.microwavejournal.com/articles/3167-mems-for-rf-microwave-wireless-applications-the-next-wave>>.
9. **Yoon Jun-Bo, Kim Bon-Kee, Han Chul-Hi, Yoon Euisik, Kim Chong-Ki.** Surface Micromachined Solenoid On-Si and On-Glass Inductors for RF Applications. — <<http://www.ece.umn.edu/groups/iml/publications/1999/55.784461.pdf>>.

(Окончание следует)