

УДК 621.316.728

ПРИМЕНЕНИЕ МЭМС-ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПЕРЕМЕННЫХ СВЧ-АТТЕНУАТОРОВ

А.Е.Кукушкин, М.И.Бичурин, А.С.Татаренко, Г.А.Семенов

MEMS TECHNOLOGY APPLICATION FOR DESIGNING MICROWAVE VARIABLE ATTENUATORS

A.E.Kukushkin, M.I.Bichurin, A.S.Tatarenko, G.A.Semenov

Институт электронных и информационных систем НовГУ, Karkev@yandex.ru

Представлены результаты исследований микроэлектромеханических систем в диапазоне СВЧ. Показаны принципы применения МЭМС-технологий при разработке переменных СВЧ-аттенюаторов.

Ключевые слова: аттенюатор; МЭМС; моделирование; переменный МЭМС-аттенюатор

This article presents the research results concerning microelectromechanical systems in the microwave region. The principles of MEMS technology application for designing microwave variable attenuators are shown.

Keywords: attenuator, MEMS, modeling, MEMS variable attenuator

Введение

Общая тенденция как отечественной, так и зарубежной электронной техники в последние годы — повышение надежности, расширение диапазона рабочих частот, увеличение коммутируемой мощности.

Переменные аттенюаторы на рpn-диодах и полевых транзисторах имеют ряд существенных недостатков, в частности большие вносимые потери, низкий уровень коммутируемой мощности недостаточный для современных устройств, а также низкое соотношение сопротивлений изоляции во включенном и выключенном состояниях.

Эти задачи при реализации переменных аттенюаторов можно решить, применяя принципиально новые МЭМС (микроэлектромеханические системы) технологии, соответствующие мировому уровню, которые будут обладать:

- высокой надежностью;
- более широким диапазоном рабочих частот — до 40 ГГц;
- незначительным вносимыми потерями (в 2-3 раза ниже в сравнении с существующими полупроводниковыми ключами);
- улучшенными массо-габаритными характеристиками;
- высокой технологичностью производства за счет совместимости его с существующими технологическими процессами изготовления цифровых и СВЧ интегральных схем.

Классификация переменных микрополосковых аттенюаторов

По способу изменения ослабления разрабатываемые аттенюаторы можно разделить на три группы:

- фиксированное значение ослабления;
- дискретное изменение уровня ослабления;
- плавное изменение уровня ослабления.

При проектировании аттенюаторов применяется базовое построение по Т- или П-образным схемам, приведенным на рис. 1.

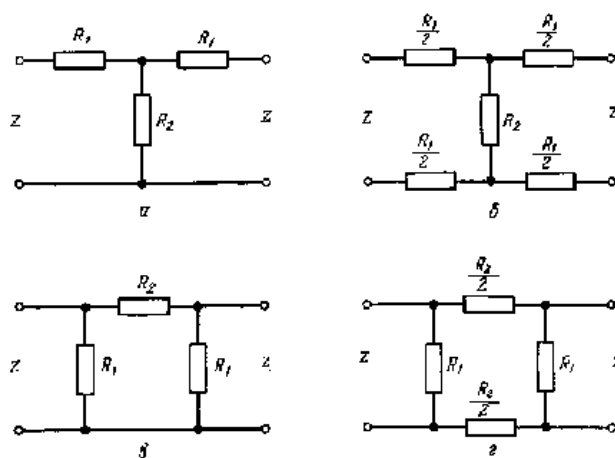


Рис. 1. Схемы построения аттенюаторов: а — несбалансированный Т-тип; б — сбалансированный Т-тип; в — несбалансированный П-тип; г — сбалансированный П-тип

Микрополосковые аттенуаторы с плавным изменением ослабления

Аттенуаторы с плавным изменением строятся на классических Т- или П-образных схемах. Для достижения необходимого уровня ослабления применяется один или несколько каскадов. В качестве активных поглощающих элементов применяются широкополосные рpn-диоды или полевые транзисторы с управляемым смещением. Управление ослаблением осуществляется изменением реактивного сопротивления диода.

При проектировании аттенуаторов с плавным изменением ослабления в широкой полосе частот возникает необходимость обеспечения одновременного изменения импедансов нескольких сосредоточенных элементов так, чтобы коэффициент ослабления монотонно изменялся в больших пределах, а коэффициенты отражения от входа и выхода изменялись незначительно. Для решения этой задачи в состав аттенуатора включают узел линеаризатора с одним аналоговым входом (для управления током или напряжением) и необходимым числом выходных, подключаемых к управляемым элементам. Лучшие модели линеаризаторов позволяют уменьшить погрешность отклонения от линейности до 3-5% от наибольшего ослабления. Однако надо иметь в виду, что энергопотребление линеаризаторов как отдельных аналоговых узлов достаточно велико. К тому же в результате их применения снижается быстродействие по цепи управления.

Микрополосковые аттенуаторы с дискретным изменением ослабления

Аттенуаторы с дискретным управлением состоят из нескольких переключаемых или подключаемых каскадов, выполненных по Т- или П-типа схемам. В качестве пассивных элементов в каскадах применяются резисторы или конденсаторы. Переключение уровней осуществляется аналоговым или цифровым сигналом. По типу управляющего элемента дискретные аттенуаторы можно разделить на электронные и электромеханические.

В электронных аттенуаторах применяются полупроводниковые ключи — рpn-диоды или СВЧ-транзисторы, обеспечивающие время переключения между уровнями от десятков наносекунд до единиц микросекунд. Недостатками данных аттенуаторов являются более низкие уровни входной мощности и высокие вносимые потери.

Электромеханическое управление осуществляется системой реле. Время переключения между дискретными уровнями составляет от единиц до десятков миллисекунд. Установка заданного значения обеспечивается двоичным кодом. Недостатками данного типа аттенуаторов являются низкая скорость переключения — от единиц до десятков миллисекунд — и большие массогабаритные характеристики. Однако эти недостатки компенсируются высокими уровнями входной мощности и малыми вносимыми потерями.

На смену устаревшим электромеханическим реле пришла новая технология — микроэлектромеханические системы. Эта технология позволяет разрабатывать МЭМС-ключи с временем срабатывания порядка единиц микросекунд. МЭМС-переключатели способны выполнять те же функции, что и электромеханические реле, но изготовлены в микроминиатюрном формате посредством технологии микрообработки, отличаются высокой скоростью переключения и повышенной надежностью.

Сравнение управляющих аттенуаторов

В аттенуаторах применяются ключи трех типов: электромеханические, полупроводниковые и МЭМС. Электромеханические переключатели превосходят все остальные по коммутируемой мощности — до нескольких киловатт на частоте 1 ГГц, имеют потери 0,1—0,3 дБ и изоляцию сигнала 60-80 дБ. Но при этом электромеханические коммутаторы имеют высокую потребляемую мощность — до 10 Вт, высокое время переключения 1-100 мс, и относительно низкий срок службы — порядка 1 млн циклов. В таблице приведены сравнительные характеристики пере-

Сравнительные характеристики переключателей

Параметр	Рpn-диод	Полевой транзистор	МЭМС	Электро-механические реле
Управляющее напряжение, В	±3-5	3—5	60—120	5—30
Потребляемый ток, мА	3—20	0	0	50—500
Время переключения	1—100 нс	1—100 нс	1—30 мкс	1—100 мс
Частота коммутируемого сигнала, ГГц	1—4	0,5—2	80	12
Вносимые потери, дБ	0,9—1,5	1—2,5	0,1—0,9	0,1—0,9
Входная мощность, Вт	≤5	≤5	≤10	≤1500
Изоляция в выключенном состоянии (1-10 ГГц)	Высокая	Средняя	Очень высокая	Высокая
Изоляция в выключенном состоянии (10-40 ГГц)	Средняя	Низкая	Очень высокая	Средняя
Изоляция в выключенном состоянии (40-100 ГГц)	Средняя	Нет	Высокая	Нет

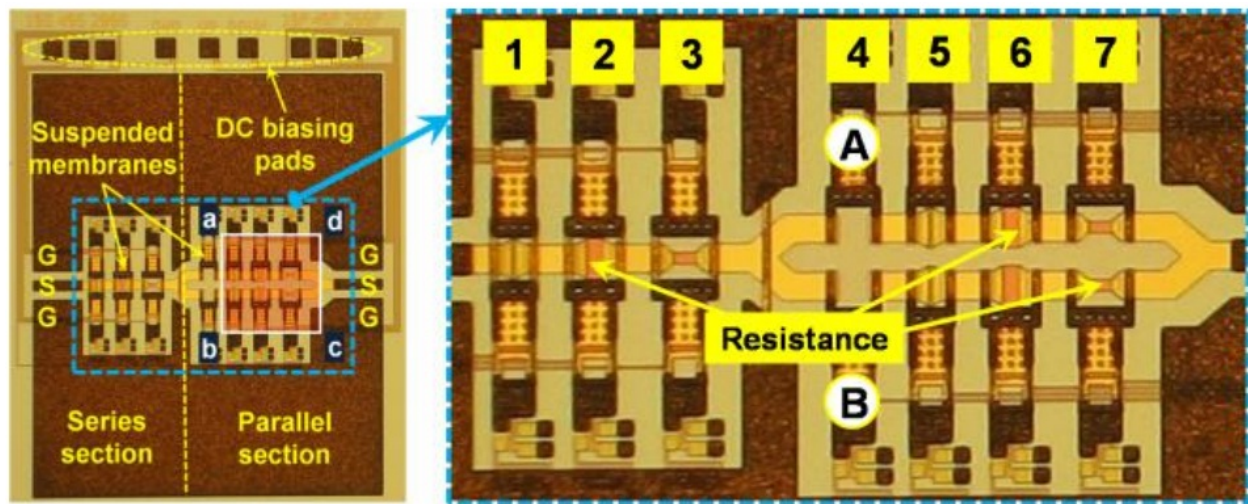


Рис.2. Микрофотография МЭМС-аттенюатора

ключателей. Из нее видно, что МЭМС-переключатели имеют преимущества перед твердотельными СВЧ-переключателями: высокое соотношение потерь к изоляции в разомкнутом и замкнутом состоянии, практически нулевое потребление мощности в замкнутом состоянии. Но при этом имеют и недостатки: низкое быстродействие по сравнению с полупроводниковыми переключателями, для управления необходимо формировать импульс переключающего напряжения от 60 до 120 В. Следует отметить, что срок службы МЭМС-переключателей составляет порядка 10^{10} циклов. Следовательно, можно сказать, что МЭМС-переключатели объединили в себе лучшие черты твердотельных и электромеханических переключателей: малые габаритные размеры, высокое быстродействие при низком собственном энергопотреблении, большой срок службы (присуще твердотельным переключателям).

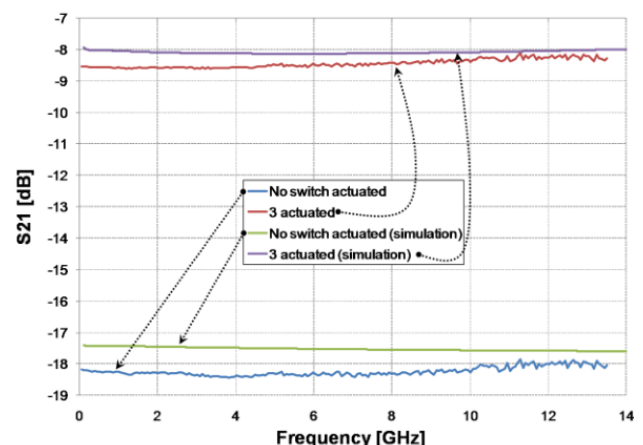
Также МЭМС-переключатели характеризуются низкими потерями и высокой линейностью в контактной области, что означает отсутствие дисторсии гармониками или продуктами интермодуляции.

Конструкция переменных МЭМС-аттенюаторов

Классический вариант построения дискретных МЭМС-аттенюаторов приведен на рис.2. Конструкция аттенюатора, разработанная инженерами FBKMEMS Research Group совместно с Болонским университетом [7], состоит из секции высоколегированных поликремневых резисторов, соединенных последовательно, и секции резисторов, соединенных параллельно. Каждый резистор может быть шунтирован МЭМС-ключом электростатического типа. Исключение отдельных резисторов позволяет менять полное волновое сопротивление линии, а соответственно, и уровень ослабления.

На рис.3 приведены характеристики параметра S_{21} для последовательных секций в двух состояниях — при шунтированном R3 и с выключенными МЭМС-ключами. Измеренный параметр S_{21} имеет линейную зависимость (изменение менее 0,5 дБ) в частотном диапазоне от 100 МГц до 13,5 ГГц. Моде-

лируемые в программе CSTTM Microwave Studio уровни ослабления ниже измеренных примерно на 0,5 дБ. Такое расхождение объясняется увеличенными по сравнению с моделью номиналами резисторов из-за применения поликремневых пленок с удельным поверхностным сопротивлением 250 ± 37 Ом/квadrat. Данный недостаток конструкции может быть устранен применением в качестве резистивных пленок других материалов или внесением в технологический процесс изготовления лазерной подгонки резисторов.

Рис.3. Характеристики параметра S_{21} последовательной секции аттенюатора

На рис.4 приведены характеристики параметра S_{21} для последовательной секции в различных состояниях. Минимальное ослабление получено, когда все сопротивления шунтированы (график 4-A, 5, 6, 7 на рис.4) и составляет от 2 до 3 дБ, максимальное от 13,5 до 19 дБ — при шунтировании резистора R4A (график 4-A на рис.4). Высокое значение вносимых потерь (при минимальном уровне) можно объяснить большим контактным сопротивлением омического МЭМС-ключа.

Разница между минимальным и максимальным уровнями составляет порядка 15 дБ. Характеристики параметра S_{21} линейны, изменение каждого уровня ослабления в частотном диапазоне от 100 МГц до 30 ГГц не превышает 3 дБ.

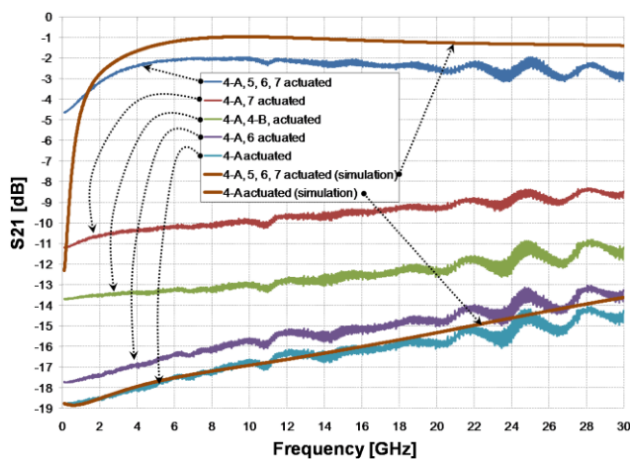


Рис.4. Характеристики параметра S21 параллельной секции аттенюатора

Применение нескольких секций позволяет расширить количество уровней и диапазон ослаблений. Для двухсекционной конструкции возможно реализовать от 20 до 180 дискретных уровней в зависимости от применяемых номиналов резисторов. На рис.5 приведены характеристики параметра S21 собранного аттенюатора. Максимальное ослабление составляет от 15 до 35 дБ для частотного диапазона от 100 МГц до 30 ГГц.

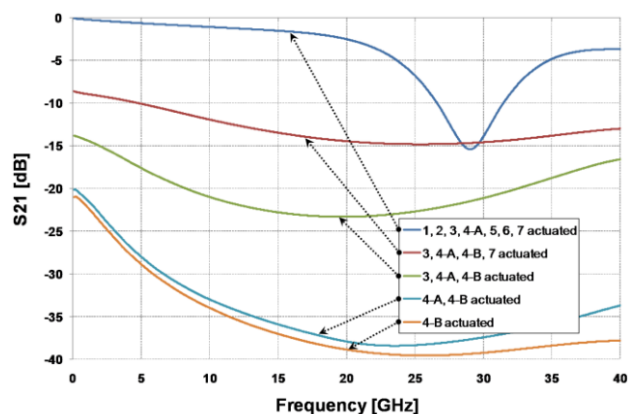


Рис.5. Характеристики параметра S21 аттенюатора

МЭМС-технологии позволяют разрабатывать переменные аттенюаторы с линейными характеристиками и большим количеством дискретных уровней. Уровень входной мощности рассматриваемых аттенюаторов достигает нескольких ватт при диапазоне изменения ослабления 35-40 дБ для двухсекционных и 60 и более для многосекционных устройств.

Основные проблемы при проектировании МЭМС-аттенюаторов

При проектировании МЭМС-аттенюаторов возникает ряд технических вопросов, обусловленных конструкцией.

Применение в МЭМС-ключах электростатического типа управления устанавливает значение управляющего напряжения от 70 до 120 В. Это является существенным недостатком при интеграции с КМОП. Данная проблема может быть решена изменением конструкции МЭМС-ключа, компания Omron

представила конструкцию МЭМС-ключа с напряжением управления 12 В с перспективой снижения до 5-7 В. В настоящее время в конструкциях аттенюаторов с низким уровнем рабочего напряжения применяются полупроводниковые элементы (драйверы накачки), повышающие напряжение с уровня 5 В до необходимого значения.

В конструкции МЭМС-ключей присутствует один или несколько диэлектрических слоев. Эта технологическая особенность в совокупности с применением полупроводниковых элементов снижает радиационную стойкость из-за накопления зарядов и радиационных повреждений в изолирующих слоях.

Основной проблемой является омический контакт МЭМС-ключа и включение его непосредственно в СВЧ-линию. Переключение ключа при протекании мощности приводит к разогреву контактов, что в свою очередь ведет к ускоренной деградации и повышенной вероятности залипания контактов. Для увеличения ресурса и повышения надежности работы возникает необходимость ограничения входного уровня мощности до нескольких ватт.

Заключение

Использование МЭМС-технологий позволяет проектировать современные дискретные аттенюаторы с параметрами, превосходящими аттенюаторы на полупроводниковых элементах, и улучшенными массогабаритными характеристиками.

Несмотря на все преимущества, МЭМС-аттенюаторы имеют ряд недостатков, для устранения которых возможно принципиальное изменение конструкции аттенюатора. Для этого необходимо вынести МЭМС структуру непосредственно из проводящего слоя микрополосковой линии в диэлектрический. Такой подход позволит исключить негативное влияние омического контакта. Ослабление регулируется изменяемой конфигурацией поглощающих неоднородностей в диэлектрическом слое. В качестве поглощающих элементов возможно использование микроэлектромеханических структур с различными способами управления. Разработка таких конструкций является перспективным направлением МЭМС устройств.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-42-06002.

1. Варадан В., Виной К., Джозе К. ВЧ МЭМС и их применение. М.: Техносфера, 2004. 528 с.
2. Басов К.А. ANSYS: Справочник пользователя. М.: ДМК Пресс, 2005. 640 с.
3. Гридчин В.А., Драгунов В.П. Физика микросистем: Учеб. пособие: В 2 ч. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. Ч.1. 416 с.
4. Iannacci J. Practical Guide to RF-MEMS. Wiley-VNC, 2013. P.372.
5. Белов Л.А. Аттенюаторы СВЧ сигнала // Электроника: НТБ. 2006. №2. С.32
6. Димитров Д., Данилин Н., Сабиров И. Радиационная стойкость модулей МЭМС // Современная электроника. 2001. №1. С.10.
7. Iannacci J., Faes A., Masotti F., Rizzoli V. A MEMS-Based Wide-Band Multi-State Power Attenuator for Radio Frequency and Microwave Applications // NSTI-Nanotech. 2010. №2. P.328-331.

References

1. Varadan V.K., Vinoy K.J., Jose K.A. RF MEMS and Their Applications. John Wiley & Sons, New York, 2002. 406 p. (Russ. ed.: Varadan V., Vinoi K., Dzhoze K. VCh MEMS i ikh primeneniye. Moscow, "Tekhnosfera" Publ., 2004. 528 p.).
2. Basov K.A. ANSYS: Spravochnik pol'zovatel'ia [ANSYS: User manual]. Moscow, "DMK Press" Publ., 2005. 640 p.
3. Gridchin V.A., Dragunov V.P. Fizika mikrosistem: ucheb. posobie v 2 ch [Physics of Microsystems. Study guide]. In 2 vols. Vol. 1. Novosibirsk, NSTU Publ., 2004. 416 p.
4. Iannacci J. Practical Guide to RF-MEMS. Wiley-VNC, 2013, p. 372.
5. Belov L.A. Atteniuatory SVCh signala [Microwave attenuators]. Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes – Electronika: Science, Technology, Business, 2006, no. 2, p. 32.
6. Dimitrov D., Danilin N., Sabirov I. Radiatsionnaia stoikost' modulei MEMS [Radiation hardness of microelectromechanical modules]. Sovremennaya elektronika, 2011, no. 1, p. 10.
7. Iannacci J., Faes A., Masotti F., Rizzoli V. A MEMS-based wide-band multi-state power attenuator for radio frequency and microwave applications. NSTI-Nanotech, 2010, no. 2, pp. 328-331.