

Кулинич И.В.¹, Сизуга Т.В.¹, Казадей В.А.²

¹Томский государственный университет систем управления

и радиоэлектроники

²АО «НПФ «Микран»

Технология изготовления СВЧ МЭМС переключателя с медной металлизацией

В работе представлена разработанная технология формирования СВЧ МЭМС переключателей с металлизацией на основе меди. Разработан технологический процесс формирования балки МЭМС переключателя по технологии 3D литографии. При забраковке изготовленных макетов СВЧ МЭМС переключателей выход годных приборов составил 70%.

Ключевые слова: СВЧ МЭМС, GaAs СВЧ МИС, переключатели.

СВЧ переключатели широко используются в системах навигации, радиолокации, связи, а также в других радиотехнических применениях. В приборах, требующих высокую скорость коммутации сигнала, традиционно используются полупроводниковые переключатели [1]. В технических решениях, не требующих высокой скорости переключения, всё большее распространение получают микроэлектромеханические (МЭМС) СВЧ переключатели [2]. Это обусловлено тем, что по ряду технических характеристик (динамический диапазон, потребляемая мощность и др.) они превосходят полупроводниковые переключатели. Традиционно МЭМС СВЧ переключатели изготавливаются с применением технологии микроэлектроники с металлизацией на основе золота [2].

В последнее время в связи с реализацией идеи гетероинтеграции полупроводниковых приборов интенсивно ведутся работы, направленные на унификацию технологий производства GaAs, GaN и Si приборов и монолитных интегральных схем (МИС). Вместо традиционных технологий изготовления GaAs и GaN МИС, использующих металлизацию на основе золота, разрабатываются технологии с металлизацией на основе меди и алюминия [3]. В связи с этим, разработка СВЧ МЭМС переключателей на основе медной металлизации, технология изготовления которых совместима с технологией производства СВЧ МИС, представляет несомненный интерес.

Одним из ключевых параметров МЭМС переключателя является количество циклов переключения, что во многом определяется конструкцией подвижной балки, а также механическими свойствами металла, используемого для изготовления балки и контактных площадок. С этой точки зрения, замена золотой металлизации на металлизацию на основе меди, имеющую лучшие механические свойства, также выглядит привлекательным техническим решением.

В работе [4] нами представлены результаты разработки СВЧ МЭМС переключателя с металлизацией на основе меди, а также приведены СВЧ электрические характеристики созданного макета. Показано, что характеристики переключателя находятся на уровне промышленно выпускаемых СВЧ МЭМС переключателей с металлизацией на основе золота.

Настоящая работа посвящена исследованию, разработке и оптимизации технологии изготовления СВЧ МЭМС переключателя с медной металлизацией, совместимой с технологией производства СВЧ GaAs монолитных интегральных схем.

2 Основная часть

Конструкция разработанного нами СВЧ МЭМС переключателя с металлизацией на основе меди описана в работе [4] и представлена на Рис. 1. Переключатель является переключателем резистивного типа [5] и выполнен в виде копланарной полосковой линии. В исходном состоянии (без подачи управляющего напряжения) между шунтирующей балкой и электродом сигнальной линии имеется воздушный зазор, и СВЧ сигнал беспрепятственно проходит по сигнальной линии (1) от входа (I) к выходу (II). При приложении напряжения на управляющие электроды (3), шунтирующая балка (4), постоянно соединённая с заземлёнными электродами (2), замыкается с электродом сигнальной линии (1) в результате чего СВЧ сигнал шунтируется на заземлённые электроды (2) и не проходит на выход II. Два управляющих электрода (3) расположены непосредственно под балкой.

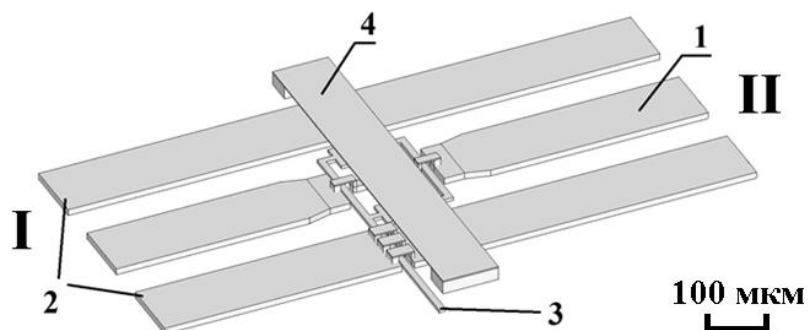


Рис. 1. Конструкция МЭМС СВЧ переключателя
1 - сигнальная линия; 2 – заземленные электроды;
3 - управляющие электроды; 4 – шунтирующая балка

За основу технологического маршрута изготовления СВЧ МЭМС переключателя с медной металлизацией был использован маршрут изготовления СВЧ GaAs МИС с металлизацией на основе меди [6, 7]. Маршрут был переработан, оптимизирован и разделен на три технологических блока. Последовательность исполнения технологических блоков включала:

- формирование заземлённых электродов;
- формирование управляющих электродов;
- формирование шунтирующей балки и воздушных мостов.

В качестве подложки в экспериментах использовались пластины полуизолирующего GaAs диаметром 100 мм. Формирование топологии элементов МЭМС переключателя проводилось с помощью лазерной литографии с разрешением 0.6 мкм.

Металлизация заземлённых электродов выполнялась на основе тонкопленочной композиции Ti/Cu, осаждаемой методом электронно-лучевого испарения. Электрод сигнальной линии изготавливался из тонкопленочной композиции Ti/Cu, получаемой методом электронно-лучевого испарения и гальванического осаждения. Металлизация управляющих электродов выполнялась на основе тонкопленочной композиции Ti/Cu/Al₂O₃ и формировалась методом электронно-лучевого испарения.

В связи с тем, что ключевыми факторами надежной работы переключателя являются геометрия шунтирующей медной балки, а также её механические свойства, во многом зависящие от метода осаждения металлизации, были исследованы два варианта реализации литографического процесса формирования балки, описанные ниже, а также

выбран оптимальный метод осаждения металлизации. В последнем случае выбор производился между осаждением плёнки меди методами электронно-лучевого испарения и гальванического осаждения.

Формирование резистивной маски для заземлённых и управляющих электродов осуществлялось нанесением комбинации плёнок фоторезистов LOR5B/AZ1505 методом центрифугирования, экспонированием резистов по заданной топологии на лазерном литографе и проявлением в щелочных проявителях AZ351 и MF319, соответственно. Удаление резистивной маски осуществлялось в органическом растворителе с последующей промывкой в изопропиловом спирте и деионизованной воде.

Формирование балки и воздушных мостов переключателя производилось с использованием жертвенного слоя. Толщина жертвенного слоя определяла толщину воздушного зазора между балкой и управляющим электродом. В качестве жертвенного слоя использовался фоторезист m-AP1225. При формировании маски для получения металлизации методом электронно-лучевого испарения, использовалась комбинация фоторезистов m-AP1225/LOR5B/AZ1505 (Рис. 2-А). При формировании резистивной маски для получения металлизации методом гальванического осаждения, использовалась комбинация фоторезистов m-AP1225/S1818, разделенных затравочным тонким слоем меди, полученным методом электронно-лучевого испарения и необходимым для последующего гальванического осаждения (Рис.2-Б).

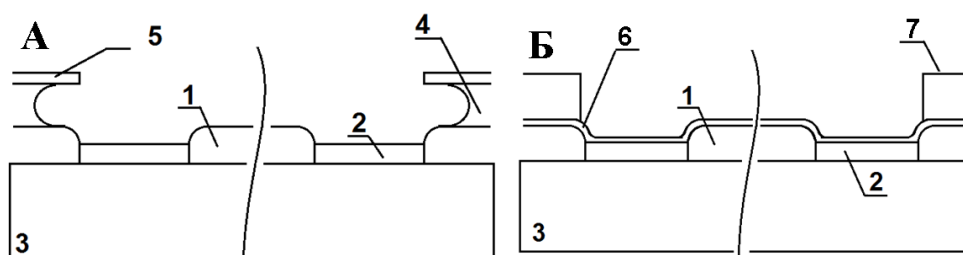


Рис. 2. Схематическое изображение комбинации фоторезистивных масок для формирования балки переключателя

1 – плёнка резиста m-AP1225; 2 - опора балки; 3 – подложка GaAs; 4 - плёнка резиста LOR5B; 5 - плёнка резиста AZ1505; 4 - ; 6 - затравочный слой Cu; 7 - плёнка резиста S1818.

А - фоторезистивная маска для получения металлизации методом электронно-лучевого испарения меди,

Б - фоторезистивная маска для получения металлизации гальваническим осаждением меди

Первый вариант литографического процесса формирования геометрии балки основывался на традиционной технологии формирования воздушных мостов для СВЧ GaAs МИС, в котором жертвенный слой фоторезиста наносился толщиной равной толщине зазора между управляющим электродом и балкой. На рис. 3 представлена фотография части изготовленной балки на краю электрода сигнальной линии, полученных по первому варианту литографического процесса. Видно, что воздушный зазор между балкой и электродом сигнальной линии на её краю (H_1) меньше, чем этот же зазор в центре электрода сигнальной линии (H_2). Это обусловлено применением для нанесения жертвенного слоя фоторезиста метода центрифугирования, в результате чего происходит частичная планаризация рельефа, а толщина жертвенного слоя фоторезиста на краю электрода становится меньше, чем в его центре. Такая разница в величине воздушного зазора должна приводить к снижению процента выхода годных изделий.

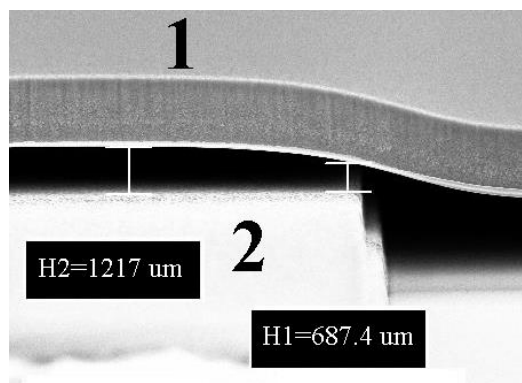


Рис. 3. Микрофотография части балки переключателя
1 – шунтирующая балка; 2 –сигнальная линия

Второй вариант литографического процесса формирования балки основывался на технологии 3D литографии, в которой путем экспонирования слоя фоторезиста различной дозой на разных участках формируется требуемый профиль. Данный метод позволяет исключить неравномерность толщины жертвенного слоя фоторезиста и, соответственно, получить одинаковый по величине воздушный зазор. Исходная толщина жертвенного слоя выбиралась больше требуемой величины зазора между балкой и электродом сигнальной линии. Она определялась параметрами литографии, таким образом, чтобы была возможность провести экспонирование с градиентом дозы и получить необходимый профиль в фоторезиста после его проявления [8].

На рис. 4 представлена микрофотография профиля, полученного в плёнке фоторезиста с использованием второго варианта литографического процесса. Из рисунка видно, что толщина жертвенного слоя фоторезиста постоянна по всему электроду сигнальной линии.

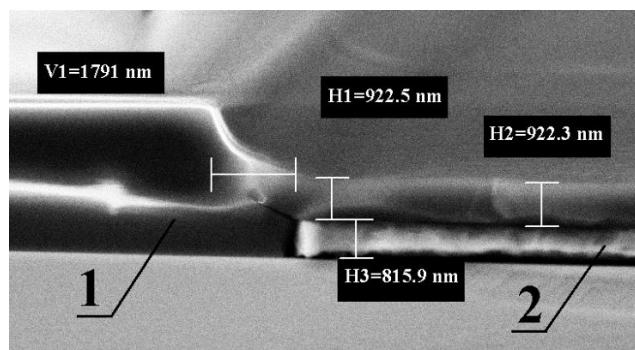


Рис. 4. Микрофотография профиля в плёнке фоторезиста
1 – жертвенная плёнка фоторезиста; 2 – электрод сигнальной линии

Макеты переключателей, изготовленные по первому и второму варианту литографического процесса, проходили отбраковку при испытаниях на циклы включения и выключения. Для переключателей, сформированных по первому варианту литографического процесса, при циклических испытаниях процент выхода годных составил 20%. Для переключателей, сформированных по второму варианту литографического процесса, процент выхода годных составил 70%.

На рис. 5 представлены микрофотографии балок СВЧ МЭМС переключателей, полученных с помощью электронно-лучевого напыления (А) и гальванического осаждения (Б). Видно, что балка, изготовленная с помощью гальванического осаждения, имеет существенно больший размер зерен и шероховатость поверхности, чем балка, изготовленная методом электронно-лучевого испарения. Для переключателей с балкой,

изготовленной гальваническим осаждением, процент выхода годных при циклических испытаниях был равен проценту выхода годных для переключателей с балкой, изготовленной с помощью электронно-лучевого напыления. При сравнении электрических параметров переключателей обоих типов была установлена разница в величинах управляющего напряжения. Переключатели с гальванической балкой имели управляющее напряжение на 1.5 В больше, чем переключатели с балкой, полученной электронно-лучевым испарением. Это свидетельствует о большей жёсткости балки, сформированной гальваническим осаждением. Также следует принять во внимание, что шероховатость поверхности электрода должна влиять на износ и коррозионную стойкость контактов, следовательно, переключатель с гальванической балкой должен иметь меньшее число рабочих циклов [9].

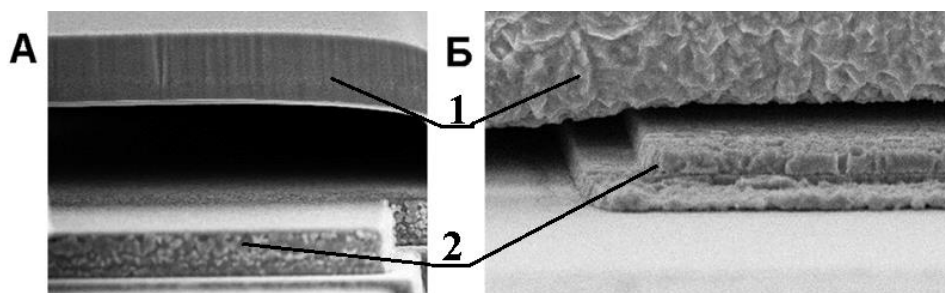


Рис. 5. Микрофотография балки переключателя
 1 – шунтирующая балка; 2 – сигнальная линия
 А – балка, полученная электронно-лучевым напылением меди,
 Б – балка, полученная гальваническим осаждением меди

На рис. 6 представлена микрофотография макета СВЧ МЭМС переключателя с металлизацией на основе меди, изготовленного по оптимизированной технологии, в которой для формирования шунтирующей балки использовался второй вариант литографического процесса и электронно-лучевое испарение. СВЧ характеристики макета переключателя представлены в работе [4] и находятся на уровне промышленно выпускаемых переключателей с металлизацией на основе золота.

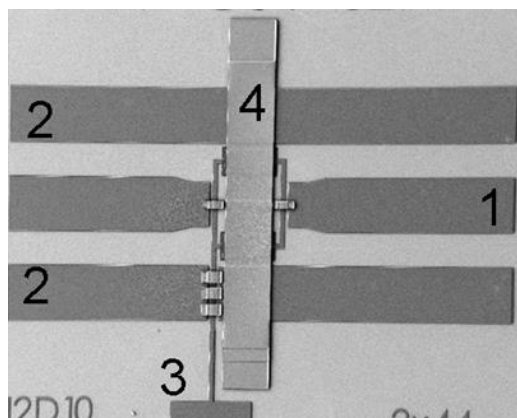


Рис. 6. Микрофотография макета СВЧ МЭМС переключателя
 с металлизацией на основе меди
 1 – сигнальная линия; 2 – заземлённые электроды;
 3 – управляющие электроды; 4 –шунтирующая балка

Заключение

В работе разработана технология изготовления СВЧ МЭМС переключателя с металлизацией на основе меди. Показано, что выход годных приборов, изготовленных по оптимизированной технологии, составляет 70 %. Разработанная технология совместима с известной технологией изготовления СВЧ GaAs МИС с металлизацией на основе меди, что создаёт основы для интеграции СВЧ МЭМС и полупроводниковых МИС на одном чипе.

Авторы работы выражают благодарность коллективу научно-образовательного центра «Нанотехнологии» ФГБОУ ВПО ТУСУР и АО «НПФ «Микран» за помощь при выполнении работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта У.М.Н.И.К. фонда содействия развитию малых форм предприятия в научно-технической сфере.

Библиографический список

- 1 “Microwave switches”. Micro-waves-101 Microwave Encyclopedia
- 2 Переключатели сверхвысокочастотных сигналов/ Белов Л. - Электроника: Наука, Технология, Бизнес. No1/2006 М.: Техносфера, 2006.
- 3 Liwen Sang, Junqing Hu. Hetero-integration of semiconductor nanostructures, CS MANTECH Conference, April 14-17, 2008, Chicago, Illinois, USA
- 4 Кулини.И.В., Кагадей В.А. МЭМС СВЧ переключатель с медной металлизацией. СВЧ-2016 Омск.
- 5 Варадан В. ВЧ МЭМС и их применение /В. Варадан, К. Виной, К. Джозе: пер. с англ. - М.: Техносфера, 2004. — 528с
- 6 Е.В. Анищенко, С.В. Ишуткин, В.А. Кагадей // Электрохимическое осаждение пленок меди для формирования второго уровня металлизации GaAs монокристаллических интегральных схем // IX международная конференция студентов и молодых ученых «ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ НАУК», Томск, 24-27 апреля, 2012, с.388-390.
- 7 С. В. Ишуткин, В. А. Кагадей, Е. В. Ерофеев, Е. В. Анищенко. Формирование межэлементной металлизации GaAs монокристаллических интегральных схем на основе меди. // Микроэлектроника. 2015. Т.44. № 4. с. 282–289
- 8 Т.В. Сигута, И.В. Кулинич Анализ технологии изготовления МЭМС ключа. Материалы международной научно-технической конференции аспирантов, студентов и молодых ученых Научная сессия ТУСУР-2016, 25-26 мая 2016, 176с.
- 9 А.И. Аристов, Т.М. Раковщик Основы метрологии стандартизации и сертификации, М.,МАДИ 2013. – 200 с