

УДК 621.382

ПОЛУЧЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ И АЗОТСОДЕРЖАЩИХ СЛОЕВ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ ИС СВЧ ИОННЫМ МОДИФИЦИРОВАНИЕМ

И. В. Перинская, В. В. Перинский

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д.77

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2018 г.

Аннотация. Предложен способ получения композитных покрытий на основе меди, алюминия – металлов, применяемых в ИС СВЧ ионно-лучевым модифицированием ионами азота и аргона. Ионное микроконструирование позволило разработать ряд оригинальных методик изготовления микрокомпонентов ИС СВЧ, создать конкурентоспособные аналоги существующих технологических процессов, используя ионно-лучевой синтез на поверхности металлов ультрадисперсного беспористого углеродного и азотсодержащего покрытий с уникальным сочетанием коррозионных, электрических и механических свойств.

Ключевые слова: ионно-лучевое модифицирование, ультрадисперсное беспористое углеродное покрытие, азотсодержащее покрытие, тонкопленочный конденсатор, тонкопленочный резистор.

Abstract. A method of obtaining composite coatings based on copper, aluminum - metals used in the microwave by ion-beam modification with nitrogen and argon ions is proposed. Ion microconstruction allowed us to develop a number of original techniques for manufacturing microcomponents of microwave, to create competitive analogues of existing technological processes using ion-beam synthesis on the surface of metals of ultrafine nonporous carbon and nitrogen-containing coatings with a unique combination of corrosive, electrical and mechanical properties. The dependence of the surface resistance of aluminum on the dose of embedded nitrogen ions, the temperature coefficient of resistance of resistors based on ion-modified aluminum films has been studied, a route for manufacturing thin-film resistors for

integrated circuits during the implantation of nitrogen ions with accelerating voltage $U_{acc}=40$ kV and dose $F=(2-8)\cdot 10^{15}$ ion/cm². The formation of interlayer microwave capacitors by ion-beam modification is based on the effects of activation and passivation of the surface of ion-modified metal samples, including passivation of a diamond-like carbon film with a non-porous film synthesized on the surface of a metal substrate by implantation of argon ions with accelerating voltage $U_{acc}=75$ kV and dose $F=3000$ μ C/cm². The results of the study of the dependence of the operational characteristics of capacitors and the percentage of yield of the mode of implantation of argon ions are given.

Keywords: ion-beam modification, ultrafine non-porous carbon coating, nitrogen-containing coating, thin-film capacitor, thin-film resistor.

1. Введение

Материалом микрокомпонентов монолитно-интегральных схем СВЧ на арсениде галлия являются токопроводящие металлы – медь, алюминий с заданными электрофизическими характеристиками, одним из способов контролируемого создания которых является ионно-лучевое модифицирование [1-3].

Использование процессов имплантации ионов электрически неактивных примесей (ЭНП) в металлы для придания заданных свойств в твердотельной технологии микроэлектронных устройств до настоящего времени не соответствует потенциальным возможностям этого метода. Причинами этого являются ограниченное распространение оборудования для ионно-лучевой обработки с необходимыми техническими характеристиками и производительностью; недостаточная изученность явлений, наблюдающихся при имплантации ионов и сопутствующих эффектов.

Ионно-лучевые возможные «варианты» основных операций изготовления компонентов микроэлектроники отличаются от традиционных способов высокой локальностью, вакуумной чистотой, производительностью, точностью и полной совместимостью между собой. Несмотря на необходимость

совершенствования ионно-лучевой технологии (развитие техники фокусирования и управления высокоэнергетическими ионными пучками, решение проблем совмещения при ионной литографии, переоснащение производства современным ионно-лучевым оборудованием), нами были сформулированы и практически реализованы отдельные методики ионно-лучевой обработки металлов, компонентов ИС СВЧ.

Известные требования к СВЧ аппаратуре, особенно морского или космического базирования, таких как повторяемость электрических параметров элементов и их стабильность в различных условиях эксплуатации, надежность и воспроизводимость сигналов, снимаемых с датчиков, приводит к необходимости внедрения в технологию их производства новых технологических решений, обеспечивающих воспроизводимость, точность, простоту аппаратурной реализации и контроля, производительность, высокую локальность операций и их совместимость между собой при достаточном выходе годных. Реализация данных требований возможна, если различные технологические операции будут основываться на технологических процессах, имеющих единую физико-химическую природу [1, 4].

Одним из процессов, все в большей мере приобретающим черты базового метода в микроэлектронике, является ионно-лучевое модифицирование материалов. Наряду с широко применяемым методом ионно-имплантационного управления электрофизическими характеристиками полупроводниковых материалов в настоящее время определилось направление ионно-лучевой обработки для управления электрохимическими свойствами металлов: осуществление операций травления, пассивации, литографии [4].

Цель настоящего сообщения – представление результатов использования ионно-лучевых методов модифицирования тонких пленок металлов, в процессе создания микрокомпонентов СВЧ устройств.

2. Методика эксперимента

В последние десятилетия весьма активизировалась разработка и исследования ИС на основе полупроводниковых соединений элементов третьей

и пятой групп Периодической таблицы химических элементов Д.И. Менделеева, главным образом на арсениде галлия, и здесь за последнее десятилетие достигнут значительный прогресс.

В изделиях СВЧ микроэлектроники используются различные металлы и сплавы, у которых стабильность электрических характеристик должна сочетаться со стойкостью их к химической и электрохимической коррозии [4]. В связи с этим целесообразно использование эффекта ионно-лучевой пассивации тонких металлических пленок (меди, алюминия) для повышения коррозионной и окислительной стойкости топологического рисунка ИС СВЧ ионно-лучевым модифицированием.

Для изготовления металлических резисторов ИС на арсениде галлия металлические слои Cu, Al наносились методами катодного напыления и мгновенного взрывного испарения на установках УВН-74Р-1 и УВН-71П-3 по стандартной методике. Контроль толщины металлического слоя осуществлялся, как непосредственно в процессе напыления путем измерения омического сопротивления «свидетеля», так и измерением высоты ступеньки травления на границе пленка-подложка на интерферометре МИИ-11. Для экспериментов использовались металлические слои толщиной 0,15-0,2 мкм. Определение однородности поверхности напыленных покрытий проводилось на микроскопе «Биолам-М» с целью выбраковки дефектных слоев (каверны, пузыри, капли металла).

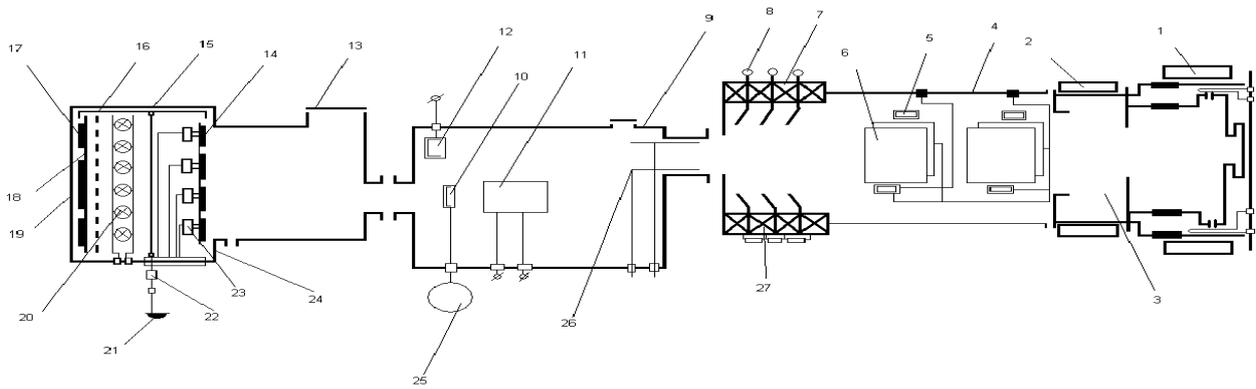
Перед облучением образцы проходили стандартный цикл обезжиривания. После обезжиривания в органических растворителях часть поверхности слоев маскировалась сменными прижимными масками, непрозрачными для имплантируемых ионов, представляющие собой керамические или металлические пластины с ровными краями. Для экспрессного формирования рисунка в металлических слоях ионное модифицирование осуществлялось через специальные накладные металлические маски, обычно применяемые в технологии селективного вакуумного напыления, с созданным в них стандартными фотолитографическими методами рисунком. Такой способ

маскирования реализовал возможность селективного облучения поверхности металлического слоя.

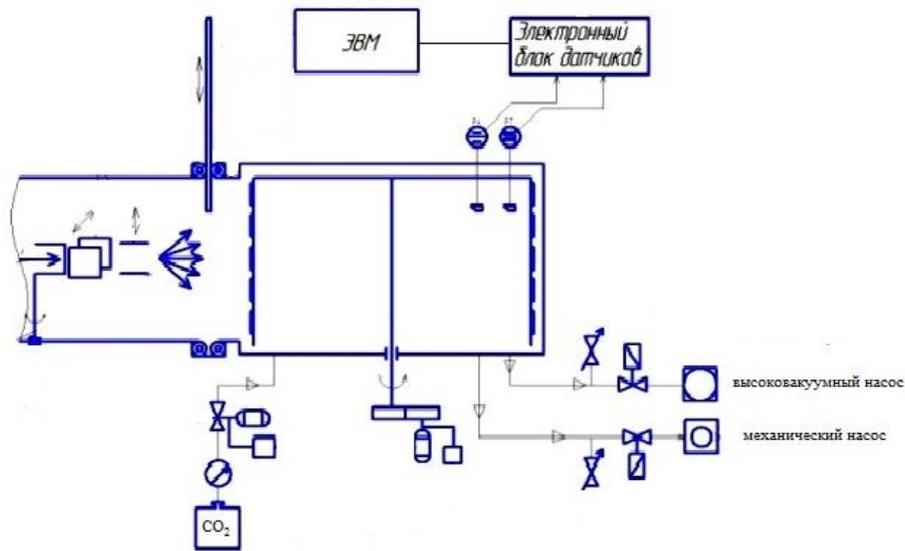
Для формирования межслойных СВЧ конденсаторов на полуизолирующие подложки из арсенида галлия марки АГЧП методом резистивного испарения в вакууме наносили металлические слои алюминия (может быть использован титан, золото) на установке УВН-71ПЗ толщиной 1400-5000 Å. В полученных слоях с помощью оптической фотолитографии формировали рисунок нижних обкладок конденсаторов. Далее облучали металлизацию первого электрода на ионно-лучевой установке при рабочем вакууме ионами аргона с ускоряющим напряжением 60 кВ и дозой 4000 мкКл/см² при плотности ионного пучка 0,2 мкА/см² в среде углеродосодержащего (СО₂) газа. Затем способом резистивного испарения в вакууме наносили металлический слой алюминия (может быть использован титан, никель, золото) на установке УВН-71ПЗ толщиной 1500-5000 Å. В полученных слоях с помощью оптической фотолитографии формировали топологию верхних обкладок конденсаторов. Площадь обкладок конденсаторов составляла 1 мм².

Основным элементом аппаратурного оформления процессов ионно-лучевого модифицирования являлась ионно-лучевая установка «Везувий-5» с максимальным ускоряющим напряжением внедряемых ионов 150 кВ и плотностью тока ионного пучка до 0,2 мкА/см² (рис.1) с модернизированной приемной камерой (рис.2).

В основу приводимых ниже экспериментально разработанных схем создания металлических резисторов и тонкопленочных конденсаторов широкого номинала значений сопротивления и емкости ионно-лучевым методом модифицирования тонких пленок металлов ИС СВЧ, с возможностью объединения в один технологический процесс, положены результаты научных исследований авторов [6-8].



а



б

Рис. 1: а- структурная схема установки ионного легирования типа «Везувий»: 1-ионный источник, 2-электромагнит, 3-масс-сепаратор, 4-корпус фокусирующей системы, 5-электрод, 6-система фокусирующая, 7-ускорительная труба, 8-кольцевые электроды, 9-система отклоняющая, 10-пластины (верт. плоскость), 11-пластины (гор. плоскость), 12-цилиндр Фарадея ЦФ-2, 13-вакуумный затвор, 14-дозиметр, 15-приемная камера, 16-контейнер, 17-образец изделия, 18-кассета, 19-крышка, 20-нагреватели, 21-привод, 22-ввод вращения, 23-дозиметр, 24-охлаждаемый корпус, 25-цилиндр Фарадея ЦФ-1, 26-пластины смещения, 27-металло-фарфоровый изолятор;
б- структурная схема приемной камеры с устройством контролируемого напуска углеродосодержащего (CO₂) газа.

3. Анализ результатов

Ионно-лучевая технология изготовления металлических резисторов ИС.

Резисторы в составе пассивной части ИС на арсениде галлия изготавливаются

либо по планарной тонкопленочной технологии, либо с использованием в качестве резистивного слоя объема полупроводника. При выборе резистивного материала учитываются следующие факторы: удельное поверхностное сопротивление, термостабильность, температурный коэффициент сопротивления, диапазон рабочих частот [2, 3].

Нами разработан технологический процесс изготовления тонкопленочных резистивных элементов на основе модифицированной ускоренными ионами тонкой алюминиевой металлизации. Зависимость поверхностного сопротивления пленок алюминия от дозы облучения ионами азота с $U_{\text{уск}}=40$ кВ представлена на рисунке 2. В качестве результата измерения принимали среднее арифметическое значение. Так как количество образцов равно 35 и это количество нельзя считать очень большим, то рассчитывался доверительный интервал. Для оценки точности измерения рассчитывали средние квадратичные отклонения от среднего значения. В качестве относительной характеристики рассеяния значений измеряемой физической величины использовался коэффициент вариации, который во всех измерениях не превышал 0,1 %.

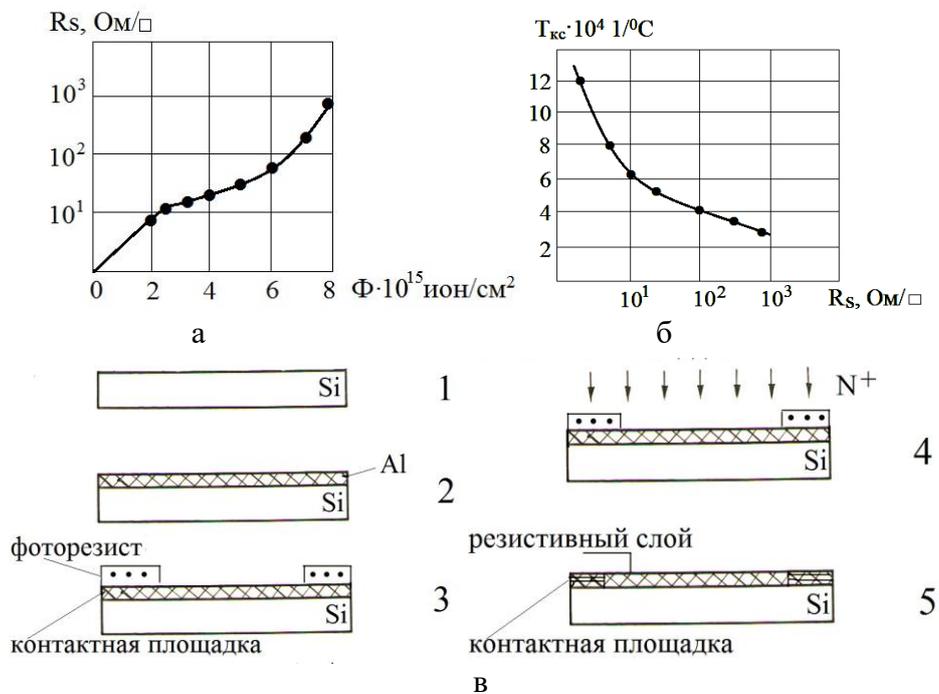


Рис. 2: а- зависимость поверхностного сопротивления (ρ) алюминия от дозы внедренных ионов азота; б- температурный коэффициент сопротивления резисторов на основе ИЛМ пленок алюминия; в- маршрут изготовления тонкопленочных резисторов для ИС: 1- полупроводниковая подложка;

- 2- напыление алюминия; 3- фотолитография;
- 4- имплантация ионов азота ($U_{уск}=40$ кВ, $\Phi = (2-8) \cdot 10^{15}$ ион/см²);
- 5- снятие фоторезиста

Образование нитрида алюминия, начиная с доз $2 \cdot 10^{15}$ ион/см², вызывает плавное изменение поверхностного сопротивления в сторону увеличения. Повышение концентрации включений нитрида алюминия, наряду с изменением поверхностного сопротивления, приводит к уменьшению температурного коэффициента сопротивления с $-2,9 \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$ до значений $+2,5 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$. В исследованном диапазоне доз температурный коэффициент сопротивления остается положительным, что связано с сохранением матричного зерна алюминия и преобладанием металлического характера проводимости (рис. 2,б).

Технология изготовления низкоомных ионно-модифицированных алюминиевых резисторов не требует дополнительной высокотемпературной термообработки, последовательность техпроцессов модификации ионами обеспечивается электрическим управлением масс-сепаратором установки ионного легирования. Номинал сопротивления определяется временем отжига (табл.1).

Таблица 1– Изменение номинала электросопротивления пленок алюминия от времени низкотемпературной термообработки и дозы имплантации ионов азота

Сопротивлени е, ρ , Ом/кВ	Доза ионов (Φ), ион/см ² ·10 ¹⁶	Ускоряющее напряжение ($U_{уск}$), кВ	Время отжига при 450 ⁰ С, мин
10	0,6	60	10
15	1,2	60	10
18	2,0	60	10
60	0,6	60	20
70-72	1,2	60	20
80-85	2,0	60	20
62	0,6	100	20
70-72	1,2	100	20
82-87	2,0	100	20
80-85	0,6	100	30
90-95	1,2	100	30
95-100	2,0	100	30

К достоинствам разработанной технологии относится возможность изготовления резистивных слоев малых номиналов, формирование контактов к резисторам в процессе их изготовления.

Формирование межслойных СВЧ конденсаторов ионно-лучевым модифицированием. Эффекты активации и пассивации поверхности ионно-модифицированных образцов металлов по отношению к стандартным химическим травителям интенсивно изучаются и используются [4].

Активацию поверхности материалов при ионной имплантации обычно связывают с введением радиационных дефектов. Возможная интерпретация причин возникновения эффекта химической пассивации металлов при ионном облучении в диапазоне ускоряющих напряжений 40-75 кВ – это наложение двух эффектов, в том числе пассивация углеродной алмазоподобной пленкой [4,9].

Эти пленки сохраняют защитные свойства даже при сверхбольших дозах ионов электрически неактивных примесей (ЭНП). Такое их поведение описано моделью квазжидкого полимерного слоя [4]. При толщине ~ 10 нм поликонденсат углеродосодержащих фрагментов атмосферы приемной обладает типичными диэлектрическими свойствами: $\rho \sim 10^{10}$ Ом·см; $E_{проб} \sim 5 \times 10^6$ В·см², нелинейной вольт-амперной зависимостью, характерной для туннельного прохождения тока через тонкие диэлектрические пленки.

Эти особенности в указанном диапазоне $U_{уск}$ ионов ЭНП объясняются целым комплексом одновременно происходящих процессов: ионизация частиц углеродосодержащей газовой среды, их адсорбция на поверхности подложки, зарядовая релаксация, образование плотного монослоя, «сшивание» его валентных связей сканирующим ионным лучом ЭНП и образование последующих монослоев, но уже контролируемое зарядовым обменом через ранее сформированную диэлектрическую пленку. При этом начальные стадии роста лимитируются исключительно дозой ионов, последующие – еще и адсорбцией заряженных радикалов, которые в свою очередь контролируются туннелированием электронов через растущую пленку полимерного диэлектрика

[4,9]. Поликонденсация происходит путем «сшивки» молекулярных фрагментов в плотном адсорбированном слое. Когда формируется островковая диэлектрическая пленка, процесс самолокализуется на свободных участках подложки (чем определяется однородность и беспористость сверхтонких пленок). Когда же пленка становится сплошной и достигает некоторой критической толщины (пороговая доза), ее дальнейший рост лимитируется туннелированием электронов из подложки в заряженный адсорбат, т.е. скоростью нейтрализации заряженных радикалов. Исследование влияния ионной имплантации на химическую активность металлических пленок в широком диапазоне технологических режимов показало, что эффект пассивации проявляется при конкретных дозах модифицирующих ионов.

Таким образом, целесообразно исследовать возможность использования ионно-модифицированной полимерной пленки в качестве межэлектродного диэлектрика при изготовлении конденсаторов.

Технологический процесс изготовления тонкопленочных конденсаторов включает в себя следующие операции.

Подача во время облучения на металлизацию нижнего электрода положительного потенциала (+200-+300)В усиливает адсорбцию углеродсодержащих мономеров на поверхности металла, что позволяет получать ионно-синтезированные пленки с оптимальными параметрами при меньших дозах облучения (500-1000 мкКл/см²) и, следовательно, сократить время технологического процесса.

Путем модифицирования нижнего электрода ионами аргона дозой 2000-7000 мкКл/см² (коэффициент перевода дозы: $1 \text{ мкКл/см}^2 = 6,23 \cdot 10^{12} \text{ ион/см}^2$) в интервале ускоряющих напряжений 60-90 кВ при плотности тока 0,05-0,2 мкА/см² на его поверхности формировалась ионно-синтезированная полимерная пленка толщиной 10-30 нм, на которую наносился верхний электрод. При площади обкладок 2 мм² тонкопленочные конденсаторы имели номинал емкости $5 \cdot 10^3 \div 5 \cdot 10^4$ пФ и пробивное напряжение 1÷5,5 В. Для

повышения пробивного напряжения использовалась двухслойная структура диэлектрика (рис. 3).

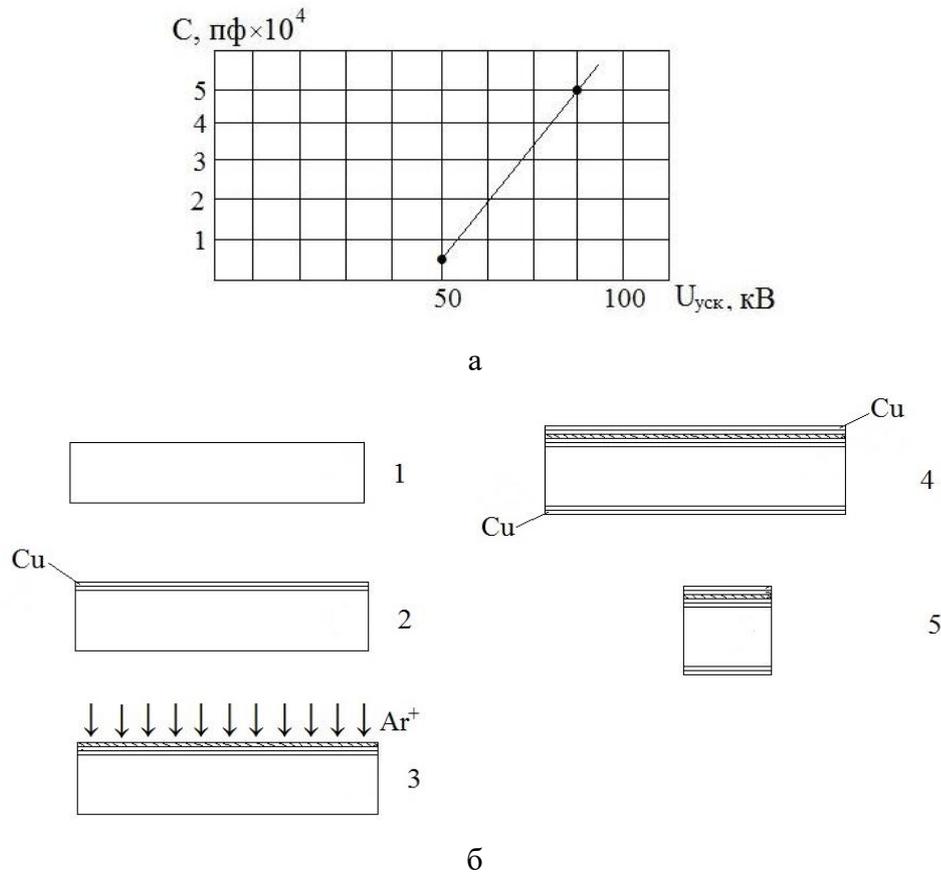


Рис. 3: а- зависимость емкости ИЛИМ конденсаторов от ускоряющего напряжения; б- маршрут изготовления конденсаторов:

- 1- подложка ($\rho=10^{-8}$ Ом·см); 2- напыление металлизации; 3- имплантация ионов аргона ($U_{\text{уск}}=75$ кВ, $\Phi=3000$ мкКл/см²);
4- формирование контактной металлизации; 5- разделение пластины на чипы скрайбированием

Номинал электроемкости полученных конденсаторов контролировали на измерителе Е7-12 при частоте 1 МГц, пробивное напряжение - по току утечки 10 мкА на приборе наблюдения характеристик транзисторов Л2-56.

Зависимость эксплуатационных характеристик конденсаторов и процента выхода годных от режима имплантации ионов аргона представлена в таблице 2.

Использование предлагаемой технологии имеет следующие преимущества:

- более высокие значения электрической прочности тонкопленочных конденсаторов;

- повышение процента выхода годных;
- снижение трудоемкости.

Таблица 2 – Зависимость эксплуатационных характеристик межслойных СВЧ конденсаторов от режима имплантации ионов аргона

Режим имплантации		Параметры конденсаторов		
Доза (Φ), мкКл/см ²	Ускоряющее напряжение ($U_{уск}$), кВ	Емкость (C), пФ	Пробивное напряжение ($U_{пр}$), В	Выход годных, %
2000	60	320-340	65-80	18
3000	60	600-640	130-140	87
4000	60	670-685	140-160	89
5000	60	680-700	140-160	90
6000	60	680-700	140-160	90
-	-	300-320	25-35	12
4000	20	470-510	130-150	16
4000	30	650-680	140-160	86
4000	60	675-680	140-160	87
4000	70	650-680	140-160	87
4000	90	470-570	130-150	86
4000	60	1200-1250	35-40	29
-	-	600-640	7-15	1
4000	60	380-450	280-300	97
-	-	180-200	100-150	56
4000	60	280-300	600-650	100
-	-	100-110	200-220	68

4. Заключение

Проанализированы особенности и области применения технологии ионно-лучевого модифицирования для изделий микроэлектроники. Исследованные в настоящей работе эффекты формирования свойств металлов ионно-лучевым модифицированием позволили разработать ряд оригинальных способов изготовления микрокомпонентов, создать конкурентоспособные аналоги существующих технологических процессов, используя ионно-лучевой синтез на поверхности металлов ультрадисперсного беспористого углеродного покрытия с уникальным сочетанием коррозионных, электрических и механических свойств.

Впервые применено модифицирование тонких пленок меди, алюминия – металлов ИС СВЧ ионами аргона для реализации технологического процесса формирования металлических резисторов и межслойных конденсаторов изделий микроэлектроники.

Литература

1. Лабунов В.А. Развитие микро- и наноэлектроники / В. А. Лабунов // Оборудование, технологии и аналитические системы для материаловедения, микро- и наноэлектроники: сб. науч. ст. V Российско-Японского семинара. Саратов, 18-19.06.2007. - Саратов, 2007. - Т.1. - С. 179-201.
2. Гассанов Л. Г., Груша С. А., Лаурс Е. П. Аналоговые монолитные интегральные схемы СВЧ на основе арсенида галлия / Л.Г. Гассанов, С.А. Груша, Е.П. Лаурс // Обзоры по Э.Т. Сер. I. Электроника СВЧ. - Москва: Изд-во ЦНИИ Электроника, 1984. - Вып. 7 (1043). - 25 с.
3. Дорфман В. Ф. Синтез твердотельных структур / В. Ф. Дорфман.–Москва: Изд-во Металлургия, 1986. -176 с.
4. Перинская И.В. Ионно-лучевая нанотехнология и компоненты СВЧ устройств / И.В. Перинская, В.В. Перинский, В.Н. Лясников. - Саратов: ИЦ «Наука», 2012. - 142 с.
5. Перинская И.В. Аппаратурное оформление имплантации ионов аргона и протонов в технологических применениях / И.В. Перинская, В.Н. Лясников, В.В. Перинский // Вестник Саратовского государственного технического университета. - 2008. - № 4(36). - С. 53-56.
6. Перинская, И.В. Электротехнологический анализ применений аргонно-лучевой пассивирующей обработки металлов / И.В. Перинская // Вестник СГТУ, 2010. – № 2 (45). – С.98-100.
7. Перинская, И.В. Практические аспекты наноструктурной модификации материалов ионно-лучевой обработкой в качестве базового метода

кластерного оборудования / И.В. Перинская, В.В. Перинский, О.А. Маркелова // Вестник СГТУ, 2011. – № 1 (53). – С.71-77.

8. Перинская, И.В. Синтез электроплазменного гидроксиапатитового покрытия на поверхности титана методом ионно-лучевой обработки / И.В. Перинская, В.Н. Лясников, В.В. Перинский, О.Д. Муктаров // Перспективные материалы, 2013. – № 8. – С.52-57.
9. Перинская И.В. Механизмы влияния ионной имплантации на химическую активность металлов / И.В. Перинская, В.Н. Лясников, В.В. Перинский // Технология металлов. - 2009. -№ 8. - С. 22-25.

Для цитирования:

И. В. Перинская, В. В. Перинский. Получение углеродных и азотсодержащих слоев на поверхности металлов ИС СВЧ ионным модифицированием. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec18/1/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.12.1