

**Министерство образования и науки Украины  
Харьковский национальный университет радиэлектроники**

**Кафедра микроэлектроники, электронных приборов и устройств**

**Домашняя контрольная работа**

**По дисциплине «Микроэлектроника и нанотехнологии»**

**По теме «Магнетронное распыление»**

**Выполнил  
ст.гр. ОТ-07-1  
Клюев П.Г.**

**Проверил  
доц. Пащенко А.Г.**

**2009**

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ВАКУУМНОГО НАПЫЛЕНИЯ.....	4
1.1 Физические основы.....	4
1.2 Диодное распыление.....	6
2 МАГНЕТРОННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ.....	7
2.1 Принципиальная схема установки и характеристики метода.....	7
2.2 Влияние магнетронной системы на свойства покрытий.....	10
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	12

## ВВЕДЕНИЕ

Создание, развитие и широкое внедрение в промышленность планарной технологии кремниевых интегральных микросхем в значительной мере обязано тому, что на поверхности кремния можно сформировать диэлектрическую пленку, обладающую прекрасными маскирующими и пассивирующими свойствами.

Получение диэлектрических пленок в технологии гибридных интегральных микросхем существенно отличается от методов, реализуемых в производстве полупроводниковых ИМС. Элементы ГИС менее чувствительны к влиянию полей, излучений, зарядов, чем их полупроводниковые аналоги. Поэтому в производстве ГИС могут использоваться практически все известные способы формирования диэлектрических пленок: термовакuumное напыление, анодное окисление, ионно-плазменное и плазмохимическое осаждения, химическое осаждение при невысоких температурах.

Процесс нанесения покрытия на поверхность определяется как свойствами материала покрытия и подложки, так и спецификой протекания процессов формирования покрытия. Исходя из выше сказанного, все методы нанесения покрытий можно разделить на две группы. В первую группу входят методы химического осаждения покрытий из парогазовой фазы (ХОП). Вторая группа – это методы физического осаждения покрытий (ФОП). К этим методам относятся: метод получения тонких пленок распылением материалов ионной бомбардировкой; метод генерации потока осаждаемого вещества термическим испарением [2].

Магнетронное распыление относится к методам распыления материалов ионной бомбардировкой. Нанесение покрытий в вакууме с помощью магнетронных систем заключается в распылении твердой мишени напыляемого материала ионами инертного газа, образующимися в плазме аномального тлеющего разряда при наложении на него магнитного поля, силовые линии которого ортогонально пересекают силовые линии магнитного поля [1].

# 1 ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ВАКУУМНОГО НАПЫЛЕНИЯ

## 1.1 Физические основы

В установках вакуумного напыления поток распыленных атомов создается либо в результате бомбардировки ионами плазмы разряда поверхности исходного напыляемого материала, находящегося под отрицательным потенциалом или являющегося катодом тлеющего разряда (ионно-плазменное распыление, разновидностями которого являются катодное, магнетронное распыления), либо за счет бомбардировки ускоренными ионами, эмитированных автономным источником (ионно-лучевое распыление). В ионно-лучевом методе для распыления используется пучок частиц высокой энергии. Для создания таких потоков частиц с контролируемой энергией разработаны системы ионных пушек.

Итак, ионное распыление – метод вакуумного напыления, в котором осаждаемый атомарный поток получают в результате бомбардировки ускоренными ионами поверхности исходного напыляемого материала и последующей инжекции распыленных атомов в паровую фазу.

Характер взаимодействия бомбардирующих ионов с поверхностью твердого тела определяется их энергией. При энергиях меньших 5 эВ, взаимодействие ограничивается физически и химически адсорбированными слоями, вызывая их десорбцию и обуславливая протекание различных химических реакций. При кинетических энергиях, превышающих энергию связи атомов в кристаллической решетке, бомбардировка вызывает разрушение приповерхностного слоя и выброс атомов в паровую фазу (распыление). Минимальная энергия ионов, приводящая к выбиванию атомов с поверхности, называется пороговой энергией распыления. Значение ее находится в интервале энергий от 15 до 30 эВ.

Характеристикой процесса ионного распыления служит коэффициент распыления, определяемый средним количеством атомов мишени, выбитых с бомбардируемой поверхности падающим ионом.

$$K_S = \frac{N_t}{N_i} \quad (1.1)$$

где  $K_S$  - коэффициент распыления,

$N_t$  - количество выбитых атомов мишени,

$N_i$  - количество бомбардирующих ионов.

Коэффициент распыления определяется энергией и направлением падения ионов, природой взаимодействующих материалов, кристаллографической структурой и атомным строением бомбардируемой поверхности.

При возрастании энергии бомбардирующих ионов свыше 100 эВ коэффициент распыления резко увеличивается и в области 5-10 кэВ выходит на насыщение. Дальнейшее повышение кинетической энергии свыше 100 кэВ приводит к снижению распыления, вызванному радиационными эффектами и внедрениями ионов в кристаллическую решетку. Диапазон энергий бомбардирующих ионов, представляющих интерес при получении покрытий, находится в пределах от 300 до 5000 эВ. Распыление вызывается, в основном, передачей импульса энергии от бомбардирующей частицы атомам кристаллической решетки в результате серии последовательных столкновений. Передача импульса от падающих ионов происходит в первых атомных слоях решетки, например, при бомбардировке поверхности поликристаллической меди ионами аргона с энергией 1000 эВ глубина проникновения равнялась трем атомным слоям. Энергия распыления атомов значительно превышает кинетическую энергию испаренных атомов и составляет 0,1-100 эВ. Распыление сопровождается эмиссией вторичных электронов, которые ускоряются в электрическом поле, вызывая дополнительную ионизацию.

Наибольшее распространение в качестве источника бомбардирующих ионов получил инертный газ аргон, имеющий массу, достаточную для распыления, и характеризующийся относительно малой стоимостью. Влияние температурных условий незначительно. Распыление металлов в твердом и расплавленном состояниях практически не различается. Исключение составляет область температур, при которых переход атомов в паровую фазу путем

испарения становится существенным и превышает распыление. Необходимо заметить, что с увеличением угла падения ионов (относительно нормали к поверхности) эффективность распыления возрастает. В зависимости от схемы распылительного устройства напыление происходит при давлении остаточных газов от  $10$  до  $10^{-2}$  Па .

Ионно-плазменный метод включает в себя катодное, диодное и магнетронное распыление. Катодное распыление заключается в следующем. Положительные ионы инертного газа, источником которого является плазма тлеющего разряда, ускоряются в электрическом поле и бомбардируют катод, вызывая его распыление. Распыленные атомы попадают на подложку и оседают в виде тонкой пленки [1].

## 1.2 Диодное распыление

Диодная установка для напыления состоит из двух плоских электродов, расположенных параллельно и отстоящих друг от друга на расстоянии 5-15 см. Катод изготавливают из напыляемого материала. Он электрически изолирован и соединен с отрицательным полюсом высоковольтного выпрямителя. Анод, он же и подложкодержатель, обычно находится под потенциалом земли. Камера предварительно вакуумируется до  $10^{-3}$  Па и на катод подается потенциал 3-5 кВ. При определенном напряжении, которое зависит от геометрии электродов, расстояния между ними и давления газа, происходит пробой и возбуждается в аргоне тлеющий разряд постоянного тока. Положительные ионы, ускоренные в прикатодной области, бомбардируют и распыляют поверхность катода – напыляемого материала. Поток распыленных атомов осаждается на подложке в виде тонких пленок. Незначительные скорости осаждения (0,01 мкм/мин), обусловлены низкой плотностью ионного тока на катоде и невысокий вакуум ограничивают применение метода. Кроме того, эмитированные катодом и ускоренные в электрическом поле (2-5 кэВ) электроны интенсивно бомбардируют анод и размещенные на нем подложки, вызывая их перегрев и радиационные дефекты в структуре [1].

## 2 МАГНЕТРОННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ

### 2.1 Принципиальная схема установки и характеристики метода

Магнетронное распыление относится к методам распыления материалов ионной бомбардировкой.

Схема магнетронной распылительной системы приведена на рисунке 2.1.

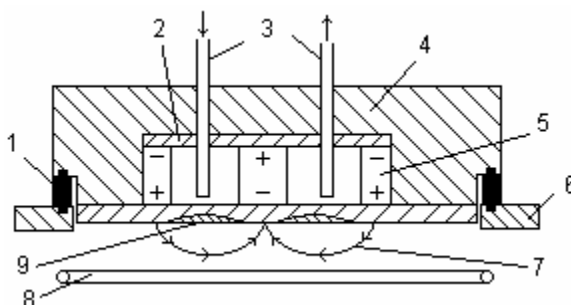


Рисунок 2.1 – Установка магнетронного распыления

На рисунке 2.1 обозначены: 1 – изолятор; 2 – магнитопровод; 3 – система водоохлаждения; 4 – корпус катодного узла; 5 – постоянный магнит; 6 – стенка вакуумной камеры; 7 – силовые линии магнитного поля; 8 – кольцевой водоохлаждаемый анод; 9 – зона эрозии распыляемого катода.

Основными элементами являются плоский катод, изготовленный из напыляемого материала, анод, устанавливаемый по периметру катода, магнитная система, обычно на основе постоянных магнитов, и система водоохлаждения. Силовые линии магнитного поля, замыкаясь между полюсами, пересекаются с линиями электрического поля. Принцип действия установки основан на торможении электронов в скрещенных электрических и магнитных полях.

Известно, что на заряд, движущийся в электромагнитном поле, действует сила Лоренца, направление которой, по правилу сложения сил, зависит от направления ее составляющих. При этом, часть силы Лоренца, обусловленная действием магнитного поля, не совершает работы, а лишь искривляет траекторию

движения частицы, заставляя ее двигаться по окружности в плоскости, перпендикулярной  $\vec{V}$  и  $\vec{B}$ .

При подаче постоянного напряжения между мишенью (отрицательный потенциал) и анодом (положительный потенциал) возникает неоднородное электрическое поле и возбуждается тлеющий разряд. Наличие замкнутого магнитного поля к распыляемой поверхности мишени позволяет локализовать плазму разряда непосредственно у мишени. Электрон циркулирует в электромагнитной ловушке до тех пор, пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа, в результате которых он потеряет полученную от электрического поля энергию. Таким образом, большая часть энергии электрона, прежде чем он попадает на анод, используется на ионизацию и возбуждение, что значительно увеличивает эффективность процесса ионизации и приводит к возрастанию концентрации положительных ионов у поверхности мишени. Это, в свою очередь, приводит к увеличению интенсивности ионной бомбардировки мишени и значительный рост скорости осаждения покрытия.

Таким образом, в магнетронных устройствах при одновременном действии электрических и магнитных полей изменяется траектория движения электрона. Электроны, эмитированные катодом, и образующиеся в результате ионизации, под действием замкнутого магнитного поля локализуются непосредственно над поверхностью распыляемого материала. Они попадают в ловушку, образуемую, с одной стороны, действием магнитного поля, заставляющего двигаться электроны по циклоидальной траектории вблизи поверхности, с другой – отталкиванием их электрическим полем катода в направлении к аноду. Вероятность и количество столкновения электронов с молекулами аргона и их ионизация резко возрастают. Из-за неоднородности действия электрических и магнитных полей в прикатодной зоне интенсивность ионизации в различных участках различна. Максимальное значение наблюдается в области, где линии индукции магнитного поля перпендикулярны вектору напряженности электрического поля, минимальное – где их направление совпадает.



Поверхность мишени, расположенная между системами входа и выхода силовых линий магнитного поля, интенсивно распыляется и имеет вид замкнутой дорожки, геометрия которой определяется формой полюсов магнитной системы. Локализация плазмы в прикатодном пространстве позволила получить значительно большую плотность ионного тока при меньших рабочих давлениях, и, соответственно, обеспечить высокие скорости распыления.

Магнетронные устройства относятся к низковольтным системам ионного распыления. Напряжение источника питания постоянного тока не превышает 1000-1500 В. При подаче отрицательного потенциала на катод, между электродами возбуждается аномальный тлеющий разряд в среде аргона. Наличие магнитной ловушки обеспечивает при одних и тех же давлениях газа возникновение разряда при более низких напряжениях по сравнению с диодными системами. Напряжение разряда составляет 300-700 В.

Магнетрон может работать в диапазонах давления рабочего газа от  $10^{-2}$  до 1 Па и выше. Давление газа и индукция магнитного поля оказывают значительные влияния на характеристики разряда. Понижение давления обуславливает повышение рабочих напряжений. В то же время для каждой магнетронной системы существует некоторый интервал значений, обычно  $10^{-1} - 1$  Па, в котором колебание давления не оказывает существенного влияния на изменение параметров разряда. Воздействие магнитного поля аналогично действию газовой среды. Поэтому низкие рабочие давления в магнетронах обеспечивают увеличение индукции магнитного поля, величина которой у поверхности катода составляет 0,03-0,1 Тл. Повышение удельной мощности способствует стабилизации разряда в области низких давлений [1].

Преимущества метода:

- высокая скорость распыления при низких рабочих напряжениях (600-800 В) и при небольших давлениях рабочего газа ( $5 \cdot 10^{-1}$  - 10 Па),
- отсутствие перегрева подложки,
- малая степень загрязнения пленок ,
- возможность получения равномерных по толщине пленок на большей площади подложек [4].

## 2.2 Влияние магнетронной системы на свойства покрытий

В зависимости от параметров процесса при магнетронном распылении покрытие  $TiN_x$  ( $x$  меняется от 1 до 0.6) может иметь микротвердость от 1400 до 4000 кгс/мм<sup>2</sup> (при температуре подложки 300-330 °С).

Зависимость микротвердости  $TiN$  от парциального давления азота имеет явно выраженный максимум (рис.2.2).

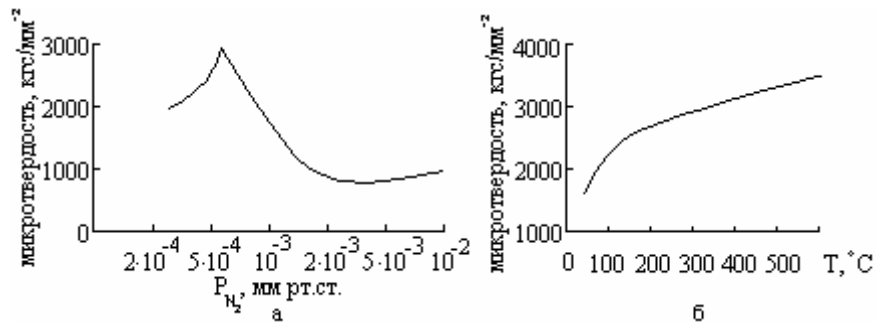


Рисунок 2.2 - Зависимость микротвердости покрытия  $TiN$  при магнетронном распылении от парциального давления азота (а) и температуры подложки (б)

На рис.2.2 показана зависимость микротвердости покрытий  $TiN_x$  от расхода азота при магнетронном распылении, при величине полезной мощности равной 2 кВт [3].

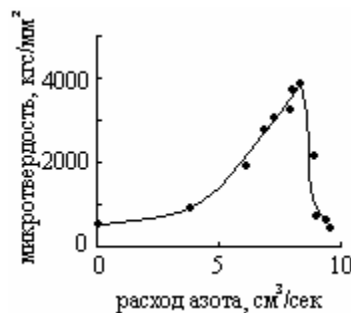


Рисунок 2.3 - Зависимость микротвердости пленки  $TiN_x$  от расхода азота

Несколько десятилетий исследований процессов магнетронного распыления позволили создать множество конструкций, но большей популярностью пользуются планарные прототипы на магнитомягком основании подложки.

Особый ферромагнитный сплав намагничивается и переходит в нейтральное состояние практически одновременно с инициированием и отключением магнитов. Параллельно создается разность потенциалов за счет подачи на катод напряжения до 1000 вольт. Периферические магниты относительно заряженного катода располагаются таким образом, чтобы силовые линии закручивали в спираль ионный факел от мишени. Это позволяет за счет многочисленных столкновений с молекулами заполняющего газа ступенчато ионизировать напыляемые ионы, исключая из технологического процесса стадию ориентирования подложки. Использование дополнительной ионизации определяет прямую зависимость параметров конденсации от силы тока и давления активной среды. Добиться прецизионного закручивания ионного факела можно лишь при постоянстве магнитных и силовых линий. Кроме того, важным параметром является стабильность плазмы, которая зависит от электрического разряда. Таким образом, к источникам тока предъявляются чрезвычайно высокие требования к минимизации колебания выходных характеристик (погрешность не может превышать 2%). Давление рабочей среды (как правило, инертные смеси) обычно изменяется в пределах  $\pm 5\%$ . Давление влияет на оптико-электрические показатели некоторых материалов. Кроме того, состав поверхностного напыленного слоя сильно зависит от химической чистоты активной среды и мишени. Таким образом, магнетронные установки требуют наличия сложных турбомолекулярных насосов непрерывного действия.

При всех положительных моментах магнетронное распыление с постоянным током не позволяет напылять оксиды с большой скоростью. Повышение производительности приводит к сильному окислению самой мишени, что сразу же делает невозможным ее использование. В этих случаях используется модифицированная технология с использованием высокочастотного тока, который препятствует изменению стехиометрического состава напыляемого материала.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Никитин М.М. Технология и оборудование вакуумного напыления. – М.: Металлургия, 1992.
- 2 Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. – М.: Радио и связь, 1987.
- 3 Заявка 20935 Англия. Механические свойства пленок нитрида титана. Плазменное осаждение пленок нитрида титана / Мюзил Дж., Вискожид Дж., Баснер Р., Уэллер Ф., 1985.
- 4 Белый А.В., Карпенко Г.Д., Мышкин Н.К. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. – Москва: Машиностроение, 1991.