

УДК 533.915:621.794

Д.А.Малик (5 курс, каф. физики плазмы), А.С. Смирнов, д.ф.-м.н., проф.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ С НЕПЛОСКИМ ЭЛЕКТРОДОМ

Высокочастотный емкостной (ВЧЕ) разряд широко применяется в плазменной технологии обработки поверхности такой как травление и осаждение пленок различных типов [1]. Эти технологии широко используются в современной микроэлектронной промышленности и в машиностроении. Основной задачей в процессе выращивания пленок является получение однородного покрытия. Однородность наносимого покрытия достигается за счет выравнивания параметров плазмы по всему объему разряда. Если обрабатываемая поверхность имеет развитый рельеф, например полость, то структура разряда и приэлектродных слоев в области полости могут существенно отличаться от параметров разряда в основном объеме плазменного реактора. Это приводит к изменению установленных параметров процесса обработки, например, к изменению локального состава газовой смеси в области полости, или интенсивности ионной бомбардировки. В результате свойства пленки в полостях могут существенно отличаться от свойств пленки на ровной поверхности.

Проблемы плазменной обработки, связанные с горением разряда в полости, могут возникать также и при гладком профиле обрабатываемой поверхности. Это связано с особенностями любого плазменного реактора, а именно, наличием отверстий газонапуска, технологических и диагностических патрубков. Присутствие плазмы в этих полостях отрицательно сказывается на технологическом процессе. Так, например, значительная часть рабочего газа может подвергнуться диссоциации уже в районе отверстий газонапуска, что приводит к существенному увеличению расхода газов, напылению неконтролируемых покрытий в районе отверстий, запылению рабочей камеры.

Перечисленные эффекты неоднократно наблюдались как в экспериментальных, так и в технологических установках плазменной обработки. Как правило, выбор технологических и конструкторских решений для подавления нежелательных последствий горения разряда вне рабочей зоны реактора производится эмпирическим путем, что связано с неоправданно большими затратами на внесение изменений в конструкцию установок и проведения большого количества пробных экспериментов. На данный момент, условия возникновения, а также физика и особенности процесса горения разряда в полой электроде при наличии ВЧ плазмы в основном объеме установки систематически не исследованы. Экспериментальное исследование, равно как и построение теоретических моделей данного явления представляет большой практический и научный интерес.

При заданных внешних параметрах, формирование структуры плазмы в области неоднородности подложки или электрода, в общем случае будет определяться соотношением геометрических размеров неоднородности с такими характерными плазменными масштабами, как толщина приэлектродного слоя, длина свободного пробега ионов и электронов, длина энергетической релаксации электронов. То есть структура плазмы будет определяться не абсолютными размерами неоднородности, а относительной величиной r_{xap}/L_s (r_{xap} – характерный размер неоднородности, L_s – ширина приэлектродного слоя). Соответственно, при заданных размерах r_{xap} и изменении, например, мощности вкладываемой в разряд может наблюдаться переход между двумя предельными случаями, а также реализовываться промежу-

точный режим ($r_{\text{cap}}/L_s \approx 1$). В данном случае неоднородность вносит существенное искажение в распределение потенциала в приграничной области. В частности, будет наблюдаться формирование радиальной составляющей потенциала как на границе плазма-слой так и в области неоднородности. Это приводит как к перераспределению потока ионов в районе полости, так и к смещению границы плазма - слой пространственного заряда. Кроме того, при определенной конфигурации потенциала создается радиальное поле, достаточное для того, чтобы вторичные электроны, эмитированные со стенок полости, периодически ускорялись и производили ионизацию. Это возможно, если выбитый электрон будет заперт в потенциальной яме или много раз отразится от стенок полости [2]. При такой ситуации в полости будет гореть самостоятельный разряд с параметрами плазмы отличными от параметров плазмы в основном объеме реактора. Очевидно, что указанный механизм является основным при формировании паразитных разрядов в полостях и диагностических патрубках разрядной камеры.

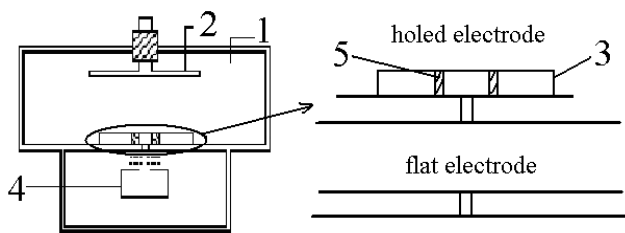


Рис. 1 Схема экспериментальной установки:
 1 - разрядная камера; 2 – ВЧ электрод;
 3 – заземленный электрод; 4 – многосеточный
 энергоанализатор, 5 – вставка
 с цилиндрическим отверстием

Задачей данной работы является экспериментальное изучение механизмов формирования плазмы и слоев пространственного заряда в области неоднородности поверхности электрода с целью определения физической взаимосвязи между параметрами и особенностями горения разряда в полости электрода и параметрами разряда в основном объеме камеры. В работе проводится анализ ионного потока на электрод из полости для различных параметров разряда и приводится сравнение с данными о потоке для случая плоского электрода.

Схема эксперимента представлена на рис.1. Разряд зажигался в Ag при давлении 30 мТорр в верхней камере (1). На верхний электрод (2) подавалось ВЧ-напряжение частотой 13.56 МГц. Диапазон вкладываемой мощности составил 1÷100 Ватт. Нижний электрод заземлен, как и корпус камеры. Подложка (3) с втулкой(5) для имитации полости располагалась на нижнем электроде. Размеры полости составляют 15 мм в диаметре и 10 мм по глубине. Отбор заряженных частиц из полости осуществлялся через отверстие, диаметром 1 мм, соединяющее разрядную камеру с нижней высоковакуумной камерой. Давление в нижней камере не превышало 10^{-5} Торр. Для анализа ионного потока использовался энергоанализатор задерживающего поля (4), принцип действия которого описан в работе [3]. Данные об ионном потоке фиксировались в виде кривых задержки. По кривым задержки определялась энергия ионов и величина полного потока из полости.

Энергетические распределения ионов из полости для различных мощностей приведены на рис.2, 3. Начиная со значения вкладываемой мощности порядка 2 Ватт, регистрируется дополнительный пик малых энергий у функции распределения. Максимум левого и минимум правого пиков наблюдается при вкладываемой мощности $\sim 5\div 8$ Ватт. При дальнейшем росте мощности пик малых энергий исчезает. Ионы с энергией ~ 5 эВ образуются в результате ионизации вторичными электронами, выбитыми из стенок полости за счет ион-электронной эмиссии. Эмитированные электроны должны ускориться в потенциале слоя до энергии ионизации, которая для аргона составляет 15.8 эВ. Время пролета электрона через слой равно обратной плазменной частоте и много меньше периода ВЧ-поля. Это означает, что электрон ускоряется в электрическом поле, равном по величине мгновенному значению ВЧ-поля в слое. Эффективный потенциал для ускорения ионов приблизительно в два раза меньше, из-за усреднения поля по фазе. Поэтому ожидаемая энергия ионов, рождаемых за счет ионизации в полости должна быть порядка 8 эВ. Это несколько отличается от получен-

ного экспериментального значения и может быть объяснено большим разрешением по энергии (2.5 В).

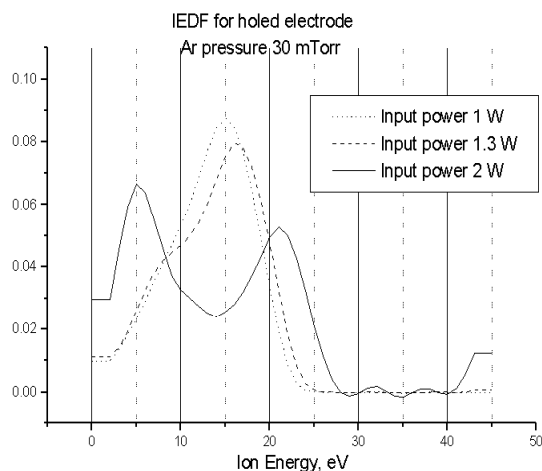


Рис. 2. Зависимость функции распределения ионов из полости от вкладываемой мощности

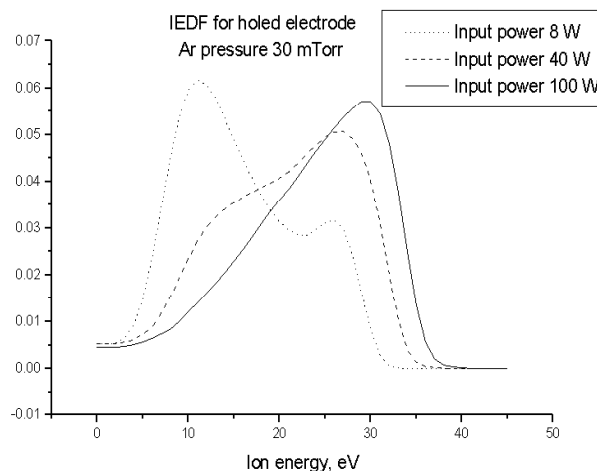


Рис. 3. Зависимость функции распределения ионов из полости от вкладываемой мощности

Энергия ионов, образованных в результате ионизации вторичными электронами значительно меньше энергии ионов, приходящих из плазмы и ускоренных в слое. Этот факт говорит о том, что ионизация вторичными электронами должна происходить в слое, а не в плазме разряда, и образованные в результате такой ионизации ионы ускоряются при меньшей разности потенциалов, чем ионы, идущие из плазмы.

Уменьшение потока ионов с энергией 20...30 эВ, приходящих из плазмы при мощности от 2 до 30 Ватт, можно объяснить изменением пространственной конфигурации приэлектродного слоя. Если граница плазма-слой не параллельна электроду и плазма частично проникает в полость, появляется радиальное электрическое поле. Наличие радиального поля в слое приводит к заметному радиальному отклонению пучка ионов от нормального направления к электроду. Когда плазма полностью проникает в полость, граница слоя становится параллельной поверхности электрода, ионизация вторичными электронами происходит в плазме и все ионы ускоряются на всей длине слоя нормально к поверхности электрода.

Полный ионный ток на электрод из полости во всем диапазоне вкладываемой мощности меньше полного тока на плоский электрод. Зависимость тока из полости от мощности линейная, так же как и для плоского электрода. Однако скорость роста тока из полости в два раза превышает скорость роста тока на плоский электрод и при больших мощностях следует ожидать, что ток из полости превысит ток на плоский электрод. Это объясняется более быстрым ростом концентрации ионов в полости за счет дополнительной ионизации вторичными электронами. Следует отметить, что вторичная ионизация происходит и в разряде с плоскими электродами, однако концентрация вторичных электронов, способных произвести ионизацию, в полости много больше за счет большего отношения площади поверхности полости к объему.

Выводы: Были получены энергетические распределения ионов, идущих из полости на электрод. Обнаружены ионы малых энергий, наличие которых может быть объяснено ионизацией вторичными электронами в приэлектродном слое. Дополнительная ионизация в полости определяется параметрами слоя в области полости (распределением и величиной потенциала) и может приводить к существенному различию между параметрами плазмы в полости и плазмы основного объема разряда.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Плазменная технология в производстве СБИС. / Под ред. Н. Айнспрука, Д. Брауна. –М.: Мир, 1987.
2. Москалев Б.И. Разряд с полым катодом. М.: Энергия, 1969. 184 с.
3. Козлов И.Г. Современные проблемы электронной спектроскопии. М.: Атомиздат, 1978.