

УДК 62-94

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРНОЙ РАБОТЫ ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПУЧКОВ ПЛАЗМЫ

*Пустовалов В.А., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
«Проектирование и технология производства электронной аппаратуры»*

*Научный руководитель: Косолапов И.А., ассистент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
shakhnov@iu4.bmstu.ru*

ВВЕДЕНИЕ.

Актуальность работы заключается в том, что ионно-плазменные процессы прочно вошли в практику производства изделий микроэлектроники при формировании многослойных пленочных структур и создания в них топологии ИС и СБИС с субмикронными размерами элементов. На сегодняшний день они являются неотъемлемой частью нанотехнологии. В настоящее время она находит все большее применение в самых различных областях промышленного производства. Эти процессы находят все большее применение в самых различных областях промышленного производства. В оптике это нанесение на стекло и полимерные материалы покрытий, изменяющих их характеристики светопропускания в различных диапазонах длин волн спектра солнечного излучения. Ионно-плазменная обработка широко используется для упрочнения режущих инструментов, защиты поверхностей материалов от агрессивных средств, для придания им декоративных свойств и т.п.

Объектом исследования является установка ионно-химического травления "Лидер-1", с установленным на ней, протяженным источником ионов, с короткой зоной ускорения. Пучок плазмы сформированный в протяженном источнике ионов с короткой зоной ускорения, бомбардирующий поверхность кварца ионами инертного газа.

Цель работы состоит в исследовании поведения работы двух независимых пучков плазмы, наложению их, отклонения от ионно-оптической оси и их взаимодействию.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

Сформулированы и классифицированы методы ионно-плазменной обработки;

Изучен и приведен принцип работы протяженного источника ионов;

Выявлены факторы влияющие на равномерность обработки всей площади поверхности подложки;

Проанализированы данные полученные экспериментальным методом;

Научная новизна работы заключается в том что теоретические расчеты сравниваются с данными полученные экспериментально, что позволит прогнозировать область травления и производить настройку протяженного источника ионов, с короткой зоной ускорения без длительных экспериментов методом Коши.

Практическая ценность работы состоит в том полученные результаты возможно использовать в последующей наладке и настройке источников ионов а также прогнозировать работу и область травления.

1. Классификация методов ионно-плазменной обработки.

Существует множество способов использования плазмы для решения технологических задач. Определяющим параметром плазмы является энергия частиц плазмы, воздействующих на обрабатываемые материалы. Понятие энергетические частицы означает, что они обладают высокой кинетической или потенциальной энергией, а также обоими видами этих энергий. Энергия определяет их способность совершать работу. В соответствии с законами физики частицы с высокой кинетической энергией могут передавать ее атомам материала в столкновениях с ними. Частицы с высокой потенциальной энергией могут, в соответствии с законами химии, отдавать ее на разрыв химических связей между атомами материала и установление с ними новых химических связей. Все рассматриваемые процессы ионно-плазменной обработки можно разделить (классифицировать), руководствуясь двумя основными признаками: какова природа (механизм) взаимодействия энергетических частиц плазмы с материалами (физическая или химическая) и каков способ (условия) реализации этого взаимодействия.

При бомбардировке поверхности ионами инертных газов взаимодействие будет определяться физическими законами обмена импульсом и энергией атомных частиц. Кинетическая энергия и импульс ионов передаются отдельным атомам вблизи поверхности в упругих столкновениях с ними. Далее происходит перераспределение энергии и импульса между атомами в каскадах упругих столкновений. Одним из результатов развития каскадов становится передача энергии и импульса поверхностным атомам материала. Энергия, передаваемая им, может оказаться достаточной для разрыва их химических связей с другими атомами материала. При условии получения этими

атомами импульса в направлении наружу из материала происходит их удаление с поверхности. Происходит так называемое физическое распыление материала. Следует подчеркнуть, что происходит именно распыление, а не испарение материала из расплавленного состояния.

При взаимодействии валентно ненасыщенных атомных и молекулярных частиц (радикалов) плазмы с атомами материала на его поверхности происходят преобразования, имеющие химическую природу. В результате обмена электронами в неупругих столкновениях радикалов и атомов между ними устанавливаются химические связи. На поверхности происходят гетерогенные химические реакции, кинетика протекания которых определяется законами химии. Одним из конечных продуктов этих реакций становится образование летучих в условиях проведения технологического процесса продуктов и необходимое удаление или осаждение на нем пленочного покрытия.

Кинетика протекания процессов взаимодействия независимо от их природы практически не зависит от того заряжена активная частица плазмы или нет. При приближении иона к обрабатываемой поверхности на расстояние порядка нескольких нанометров происходит его нейтрализация электронами, вырывающимися из материала.

Специфика ионно-плазменных процессов состоит в том, что в них невозможно полностью разделить кинетику физического и химического взаимодействия. Оба механизма, как правило, действуют одновременно и способствуют протеканию друг друга. Физическое взаимодействие ионов инертных газов сопровождается инициированием радиационно-химических реакций. Результатом этих реакций становится разложение или полимеризация сложных по составу органических материалов (фоторезистов, масляных пленок), селективная сублимация и восстановление из окисленного состояния поверхности. Эти процессы приводят к изменению прочности химических связей атомов на поверхности, т.е. к увеличению или уменьшению возможности их распыления.

Ускоренные химически активные ионы имеют кинетическую энергию, достаточную для распыления материалов. Хотя в этом случае основным механизмом взаимодействия являются химические реакции, сопутствующая ионная бомбардировка, способствует их ускорению за счет изменения энергетического состояния поверхности. Выбивание атомов приводит к энергетической активации поверхности. Эта активация состоит в создании дополнительных активных центров на поверхности (атомов с ненасыщенными химическими связями), инициировании процессов диссоциации адсорбированных поверхностью малоактивных нейтральных молекул рабочего газа, которые превращаются в высоко химически активные радикалы. В условиях

сопутствующей ионной бомбардировки появляется возможность протекания новых реакций. Хотя кинетика физических и химических процессов взаимосвязана, в реальных процессах ионно-плазменной обработки всегда можно выделить основной и вспомогательный (стимулирующий) механизмы взаимодействия ионов с обрабатываемыми материалами. Второй признак классификации определяется различием условий проведения процесса ионно-плазменной обработки при различных способах ее осуществления. Способ определяет условия, в которых находится поверхность обрабатываемого материала и качество обработки. Различают два основных способа обработки: плазменный и ионный. Если обрабатываемый материал помещен в плазму или в непосредственной близости от нее и подвергается воздействию всего набора ее частиц, следует говорить о плазменном методе обработки. Если материал находится вне плазмы и обрабатывается, в основном, отбираемыми из нее ионами, то говорят об ионно-лучевом методе обработки. Природа активных частиц определяет преимущественный механизм их воздействия на материал: физический или химический. Различным методам ионно-плазменной обработке соответствуют характерные диапазоны давлений в области воздействия частиц плазмы на материал. Следует помнить, что степень ионизации газа в низкотемпературной плазме достаточно мала и рабочее давление процесса обработки определяется концентрацией нейтральных его частиц, которые практически не участвуют в процессе обработки. Известно, что при своем движении к поверхности энергетические частицы плазмы испытывают упругие столкновения с частицами остаточного и рабочего газа и могут быть рассеяны. Происходит изменение направления движения и теряется их энергия. Такое же рассеяние испытывают частицы материала, удаляемые с поверхности. В результате на пути движения к подложке они теряют свою высокую начальную энергию. Энергия распыленных частиц, составляющая несколько электрон-вольт в результате этих потерь может уменьшиться до энергий, соответствующих термически испаренным частицам. Часть распыленных частиц может отразиться обратно на обрабатываемую поверхность. Происходит процесс переноса (перепыления) распыленного материала с места на место. С ростом давления в процесса ионно-плазменной обработки вероятность рассеяния увеличивается. Метод обработки определяет соотношение между физическим и химическим механизмами взаимодействия. Плазменному способу соответствует более высокий диапазон давлений ($5 \cdot 10^{-2}$ - $5 \cdot 10^{-1}$ тор, ионному - более низкий $5 \cdot 10^{-4}$ — $5 \cdot 10^{-2}$ тор). При ионно-лучевом методе области формирования плазмы и обработки материала связаны между собой только щелью с

ограниченной газовой проводимостью. По этой причине вблизи поверхности подложек обеспечивается более низкое давление.

Классификация по этим двум характерным признакам определяет сравнительно небольшую группу различных методов ионно-плазменной обработки: плазменное, дуговое, магнетронное, высокочастотное распыление, плазменное осаждение, плазменное и ионно-лучевое нанесение и травление. Все иные по наименованию процессы являются лишь разновидностями перечисленных и отличаются только используемыми техническими средствами. Приведем краткую характеристику основных процессов ионно-плазменной обработки и областей их практического применения.

Травление распылением (sputter etching) в плазме инертного газа - повсеместное или локальное удаление материала с его поверхности физическим распылением. Обрабатываемый материал помещается в плазму или в непосредственной близости от нее. Ионная бомбардировка происходит при подаче на него высокого отрицательного электрического потенциала (0,5 - 3 кВ). Разновидности этого метода определяются техническими средствами, обеспечивающими ионизацию газа, формирование плазмы и ионную бомбардировку поверхности материала. К этим методам относятся катодное, магнетронное распыление и распыление в дуговом разряде электропроводящих материалов, ВЧ и СВЧ - распыление диэлектрических материалов. Катодное распыление подразумевает использование тлеющего разряда в постоянном электрическом поле для создания плазмы и обработки электропроводящих материалов. При триодном способе распыления используется несамостоятельный тлеющий разряд. Необходимые для поддержания разряда электроны эмитируются вспомогательным термокатодом. Этот метод реализуется с помощью диодных и триодных устройств распыления, в которых обрабатываемый материал располагается на катоде. Распыление проводится при давлениях рабочего газа порядка $5 \cdot 10^{-3}$ - $5 \cdot 10^{-2}$ тор. При таких относительно высоких давлениях распыленные частицы испытывают многочисленные столкновения с атомами рабочего газа. В результате до 90 % распыленного материала может отражаться обратно на поверхность. Процессы с использованием переменных электрических полей (ВЧ и СВЧ) предназначены для обработки диэлектрических материалов. Эффект распыления диэлектриков достигается за счет того, что более подвижные электроны плазмы за время положительного полупериода электрического поля нейтрализуют наводимый ионами за время отрицательного полупериода положительных процессов ВЧ ниже, чем в процессах с использованием разряда в постоянном электрическом поле. Это снижение определяется более высокой степенью ионизации газа в разрядах этого типа. Основное практическое применение травление распылением в плазме находит при очистке металлических,

полупроводниковых и диэлектрических подложек перед нанесением на них пленочных покрытий.

Ионно-лучевое травление (Ion beam etching) представляет собой процесс распыления материалов направленными потоками (пучками) ускоренных до энергий 0,5 - 5 кэВ ионов инертного газа. Ионизация газа в электрическом разряде, формирование пучков и ускорение ионов происходит в автономных устройствах (ионных источниках). Не требуется подача отрицательного электрического потенциала на обрабатываемую поверхность. Предварительно ускоренные до высоких энергий ионы способны распылять как проводящие, так и диэлектрические материалы. Наводимый положительный потенциал на поверхности диэлектриков недостаточен для отражения ионов, т.е. не может препятствовать распылению. Поскольку области формирования пучков и обработки материала разделены, давление в области взаимодействия ионов с материалами составляет $5 \cdot 10^{-4}$ - $1 \cdot 10^{-3}$ тор. В этом методе имеется возможность направлять пучок ионов на поверхность углами и обеспечивать прецизионность (высокое разрешение) процесса травления. Технические возможности этого метода определяют его основное назначение - создание топологии ИС и СБИС с микронными и субмикронными размерами элементов на поверхности материалов.

Ионно-плазменное нанесение (Ion-plasma deposition) - формирование пленочных покрытий распылением мишени из требуемого материала в плазме инертного газа с последующим переносом его на подложки. Давление газа в процессах ионно-плазменного нанесения в диодных системах $5 \cdot 10^{-3}$ - $5 \cdot 10^{-1}$ тор. В триодных системах распыления давление может быть снижено до $5 \cdot 10^{-3}$ - $1 \cdot 10^{-3}$ тор. Ионно-плазменное нанесение используется для получения пленок практически любых материалов. Высокая энергия распыленных частиц обеспечивает высокую плотность осаждаемых на подложках пленок и их высокую адгезию. Относительно высокое рабочее давление процесса определяет большую вероятность обратного отражения распыленных частиц на мишень и потери ими энергии на пути движения к подложке. Эти потери частицами энергии снижают качество формируемых пленочных покрытий.

Реактивное ионно-плазменное нанесение (Reactive ion-plasma deposition) - формирование на подложках пленок материалов, содержащих в своем составе атомы материала распыляемой мишени и атомы химически активного газа, являющегося составной частью газовой плазмы. Для создания плазмы в этом случае используются, как правило, смесь инертного (аргона) и реактивного газа (кислорода, азота, двуокиси углерода). Ионы аргона, как более тяжелые, обеспечивают эффективное распыление

мишени. Пленки на подложках формируются в результате химических реакций между атомами распыленного и осажденного на них материала и атомами или молекулами реактивного газа. Наиболее широко этот метод используется при формировании на подложках пленок многокомпонентных материалов /окислов, нитридов, оксинитридов, карбидов и т.п. Регулировкой состава и парциального давления реактивных газов в составе смеси можно управлять составом получаемых пленочных покрытий.

Нанесение ионно-лучевым распылением (Ion-beam sputter deposition) - формирование пленочных покрытий распылением мишени из проводящих (в том числе магнитных) и диэлектрических материалов направленным пучком энергетических ионов инертного газа (аргона). Метод реализуется при давлениях $5 \cdot 10^{-4}$ - $1 \cdot 10^{-3}$ тор. В этих условиях распыленные частицы материала мишени достигают подложки без соударений с частицами газа и сохраняют свою энергию. Низкое рабочее давление, возможность распыления практически любых материалов, большие возможности управления процессом, делают метод уникальным при формировании многослойных пленочных структур разнородных материалов.

Реактивное ионно-лучевое нанесение (Reaction ion-beam deposition) - формирование сложных по компонентному составу пленочных покрытий распылением материала мишени пучками ионов инертного газа при подаче в область формирования пленки реактивного газа. Могут использоваться пучки ионов химически активных газов или пучки, состоящие из смеси ионов инертного и химически активного газов. Метод позволяет наносить пленки окислов и нитридов распылением мишеней из соответствующих материалов. Процесс нанесения осуществляется при давлениях в области осаждения пленок $5 \cdot 10^{-4}$ - $1 \cdot 10^{-3}$ тор в условиях, при которых распыленные частицы материала сохраняют высокую энергию. При оснащении технологического объема несколькими источниками ионов для распыления отдельных материалов можно создавать пленочные покрытия, уникальные по составу и варьировать этим составом в процессе их формирования.

Нанесение в дуговом разряде (Arc = charge deposition) - занимает несколько обособленное место в ряду перечисленных методов ионно-плазменной обработки. Это связано с тем, что в качестве "рабочего газа" выступают, главным образом, термически испаренные частицы материала катода (пары металла), образующиеся в результате его разогрева. Эти пары частично ионизируются в разряде между изолированными относительно земли анодом и катодом. Образовавшиеся ионы ускоряются в направлении катода (распыляемой мишени). Кинетическая энергия, получаемая ионами невелика (порядка 100 -200 эВ) из-за малой величины ускоряющего потенциала. Фактически на

подложки осаждаются испаренные частицы материала, имеющие соответствующие им тепловые энергии. В тоже время, сопутствующая ионная бомбардировка подложки, на которую подается отрицательный относительно земли потенциал (порядка 100 - 150 В), обеспечивает энергетическую стимуляцию процесса формирования на не пленки. В результате достигается повышенная адгезия и плотность пленочного покрытия

Плазмохимическое травление (Plasma-chemical etching) - удаление материала с поверхности в результате взаимодействия с ней химически активных частиц плазмы. Химическая природа процесса определяет их высокую селективность - избирательность воздействия по отношению к различным материалам. Как правило, плазма создается в среде различных галогенуглеродов и их смесей с инертными газами, водородом, кислородом и азотом. Продукты взаимодействия частиц плазмы (радикалов) должны иметь достаточно высокие равновесные давления паров при температурах, близких к комнатной, т.е быть легколетучими. В этом случае они могут быть удалены из технологического объема откачкой. Использование галогенуглеродов определяется способностью образования ими легколетучих соединений с различными материалами. Для создания плазмы в процессах плазмохимического травления используются ВЧ и СВЧ - электрические разряды. Плазмохимическое травление проводится при давлении $5 \cdot 10^{-3}$ - $5 \cdot 1^2$ тор, что определяет его низкую разрешающую способность. При таких давлениях в результате многочисленности столкновений движение химически активных частиц хаотично. Полностью отсутствует направленность (анизотропность) их движения относительно обрабатываемой поверхности. Основное назначение метода заключается в очистке поверхности подложек и удалении (сжигании) фоторезистивной маски после формирования через нее топологии ИС и СБИС в пленочных покрытиях.

Реактивное ионно-плазменное травление (Reactive ion-plasma deposition) - разновидность плазмохимического травления. Отличие состоит в том, что в процессе удаления материала с поверхности участвуют как ионы, так и радикалы химически активного газа. Для ускорения ионов в направлении к поверхности на нее подается отрицательный электрический потенциал. Обработка ионами и более низкое рабочее давление придает определенную направленность процесса травления. Обеспечивается более высокое в сравнении с плазмохимическим травлением разрешение. Процессы плазмохимического и его разновидности реактивного ионно - плазменного травления экологически более безопасны в сравнении с процессами жидкостного химического травления, поскольку в качестве исходных плазмообразующих газов используются

безопасные в условиях атмосферы газы. Это качество определяет перспективность применения этих процессов в технологических целях.

Ионно-химическое травление (Ion-chemical etching) - травление материалов направленным потоком ускоренных до энергий 0,5 - 3 кэВ химически активных ионов. Удаление материала происходит в результате физического и химического взаимодействия ионов с поверхностью материалов. Химическая активность ионов определяет высокую селективность (избирательность) их воздействия на материалы различного химического состава. Например, при определенном подборе рабочего газа и режима процесса травления, скорости травления, таких близких по составу материалов, как кремний и его окисел, могут различаться в два раза в ту или другую сторону. Химическая природа процесса ионно-химического травления определяет более высокую скорость удаления его с поверхности в сравнении с ионно-лучевым травлением. В зависимости от обрабатываемого материала скорости могут различаться в несколько раз. Направленность движения ионов и относительно низкое давление 10^{-3} - $5 \cdot 10^{-4}$ тор в области обработки обеспечивают высокую направленность процесса травления, что обеспечивает высокую прецизионность. Метод позволяет при создании топологии ИС вытравливать элементы субмикронных размеров.

Плазма и ионно-химическое осаждение (Plasma and ion-chemical deposition) - формирование пленочных покрытий из частиц плазмы на поверхности материала, помещенного в нее, путем разложения в разряде газообразных соединений, содержащих требуемый для покрытий материал с последующим его осаждением. Для реализации этого процесса используются разряды на постоянном токе и ВЧ -разряды. Для создания необходимых условий процесса формирования пленок на подложку подается отрицательный электрический потенциал (порядка 100 В), ускоряющий в направлении ее поверхности ионы из плазмы. Ионная бомбардировка обеспечивает энергетическую активацию поверхности подложки. При осаждении из ионных пучков частицы осаждаемого материала уже имеет достаточную для формирования качественной пленки энергию. В качестве рабочих газов используются углеводороды, галогеноуглероды, силаны и их смеси с водородом и другими газами. Отличительной особенностью этого процесса является более низкая в сравнении с термическими и пиролизическими процессами температура получения пленок необходимого качества. Она в большинстве технологических процессов, как правило, не превышает 350 -450 К. Эти процессы применяются при формировании пассивирующих покрытий из двуокиси и нитрида кремния на поверхности кремния, получении пленок силицидов переходных металлов, алмазоподобных углеродных пленок, углеродных нанотрубок.

2. Принцип работы протяженного источника ионов.

Универсальными с точки зрения выполнения практически всех технологических операций: очистки, травления, энергетической активации поверхности перед и в процессе несения пленочных покрытий, являются ионно-лучевые устройства. Такие устройства представляют собой либо собственно автономный источник ионов, либо конструкцию из источника и распрыляемой мишени или каруселью мишеней. При подаче рабочего газа в источник ионов внутри него между изолированным от земли водо-охлаждаемым анодом и заземленным катодом зажигается разряд магнетронного типа. В промежутке анод - катод в разрядной камере создается плазма с объемной плотностью ионов $10^{10} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Ионизация газа, сохранение состояния плазмы, отбор ионов с ее границы и их ускорение составляют основные этапы формирования пучка ионов для обработки материалов. Из отверстия или щели (множества отверстий или множества щелей) извлекается сформированный пучок (луч) ускоренных до энергий от нескольких сотен до нескольких килоэлектронвольт ионов, который направляется на объект обработки. В отличие от магнетронных устройств распыления условия горения разряда, формирования плазмы и отбора ионов осложнены малыми размерами внутренних габаритов источника ионов. Внутренний объем источника, и технологический объем связаны между собой проходным каналом (отверстием или узкой щелью) с ограниченной газовой проводимостью. Поскольку газ подается в источник ионов, в нем создается давление порядка $5 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-3}$ тор, необходимое для зажигания и стабильного горения разряда. В области обработки материала сохраняется более низкое давление $5 \cdot 10^{-4} - 10^{-4}$ тор, оптимальное для проведения качественного технологического процесса.

Первыми в технологических целях использовались многоканальные источники ионов с термоэмиссионным катодом типа Кауфмана с разрядом на постоянном токе. Эти источники изначально разработаны как двигатели для коррекции орбит космических аппаратов. Известны разновидности этого типа источников с ВЧ и СВЧ возбуждения плазмы. Сегодня они практически не применяются. Причина этого заключается в технической сложности этих источников. Кроме того, для решения различных технологических задач сегодня все больше в качестве рабочих используются различные реактивные газы. Применение таких газов несовместимо с термоэмиссионным катодом, в атмосфере которых он просто сгорает. Наибольшее применение на сегодняшний день нашли источники ионов с холодным катодом с замкнутым дрейфом электронов с протяженной и короткой зоной ускорения. На рис. 1 приведены схема области

формирования плазмы, отбора и ускорения ионов, а также распределение силовых линий магнитного поля в этой области (а), и варианты схем источников ионов с холодным катодом, наиболее широко используемых в технологиях ионно-плазменной обработки. В промежутке анод - катод в скрещенных электрическом и магнитном полях в области щели зажигается разряд и формируется плазма. Щель, из которой инжектируется пучок ионов, представляет собой симметричный замкнутый контур, вдоль которого вблизи щели дрейфуют электроны - течет холловский ток. Как и в магнетроне магнитная система источника представляет из себя набор постоянных магнитов, размещенных внутри источника, и магнитопровод с полюсными наконечниками.. Частями магнитопровода являются магнитомягкий проводник, полностью замыкающий в себе магнитное поле, и полюсные наконечники ионной оптики в щели источника, из которой извлекается пучок ионов. Форма наконечников и ширина щели источника h определяют конфигурацию и величину напряженности магнитного поля в области ионизации и ускорения. В зоне ускоряющего промежутка, параллельной оси щели источника, направления электрического и магнитного полей приблизительно взаимоперпендикулярны. Это зона максимальной ионизации газа и отбора ионов из плазмы.

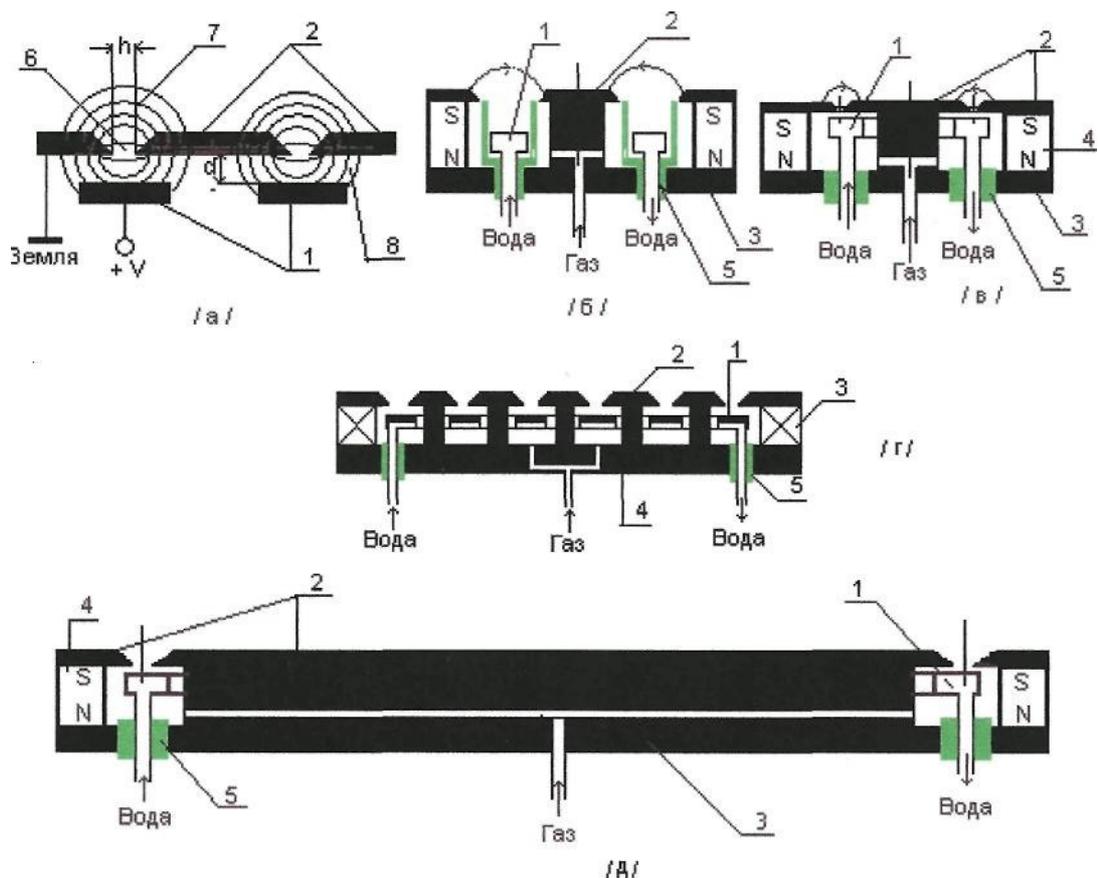


Рис. 1. Схемы области формирования отбора и ускорения ионов (а) и источников ионов: источник ионов короткой зоной ускорения (б), источник ионов с длинной зоной ускорения (в), многопучковый источник ионов (г) и протяженный источник ионов с короткой зоной ускорения (д); 1 - анод, 2 - наконечники магнитной системы (заземленный катод), 3 - магнитопровод, 4 - магнитная система, 5 - изолятор, 6 - щель для инъекции ионного пучка, 7 - силовые линии магнитного поля, 8 - разрядный промежуток.

3. Факторы влияющие на равномерность обработки всей площади поверхности подложки;

Основными техническими параметрами источников являются: плотность тока ионов в пучке, ее распределение по сечению пучка, энергия и распределение по энергиям ионов в пучке, степень независимости управления энергией и током ионов, коллимированность (параллельность траекторий движения ионов) пучка.

Одной из проблем при использовании ионно-плазменных устройств является обеспечение равномерности обработки всей площади поверхности подложек. Допустимая неравномерность процессов травления и нанесения не должна превышать 1 - 3 и менее процентов. В наибольшей степени равномерность достигается правильным выбором системы распределения потоков рабочего газа по длине зоны обработки. Она должна обеспечивать одинаковость локальной концентрации ионов или радикалов по всей области разряда в однородных по напряженности электрическом и магнитном полях. Их концентрации зависят от концентрации газа в этих локальных областях, При высоких концентрациях газа степень ионизации будет выше, при низких - ниже. В результате появляется неравномерность воздействия частиц плазмы на обрабатываемый объект, т.е. неравномерность очистки, травления или нанесения. Влияние распределения газа на работу магнетрона не столь критично. Газ может подаваться практически в любое место технологической камеры. Ее большой объем позволяет газу равномерно распределяться и его локальные концентрации в отдельных зонах распыления мишени практически одинаковы. Другое дело обеспечение равномерного распределения потоков газа по длине щели источника, из которой инжектируется пучок ионов. Неравномерность ионизации в локальных областях приводит к возникновению неравномерности распределения плотности тока ионов по сечению пучка. Поскольку габариты источников ионов ограничены, и подача рабочего газа в него осуществляется только через один канал, наиболее эффективно использование деление газового потока. Для этого может быть использована схема последовательного удвоения числа каналов протока газа равного сечения. По этой схеме производится последовательное многократное деление на двое поступающего в источник газового потока. В конечном итоге газ в разрядную поступает через множество отверстий, равномерно распределенных по длине области разряда (по длине щели).

4. Анализ данных полученных экспериментальным методом.

Измерения проводились путем фиксированием частоты исследуемых образцов кварца до процесса и после процесса ионно-химического травления. Зная частоту можно рассчитать толщины образцов, а при фиксированном времени скорость и интенсивность пучков.

Были проведены эксперименты для уточнения формы пучков с распределением от центра мишени. Результаты представлены на рисунке 2 и рисунке 3.



Рис. 2. распределение пучка №1



Рис. 3. распределение пучка №2

После получения экспериментальных данных, была рассчитана возможная характеристика путем математического суммирования распределений а также в расчете был увеличено напряжение питания в 1.2 раза для сглаживания интенсивности по всей плоскости мишени.

Результат расчетов представлен на рисунке 4.



Рис. 4. Математическая сумма двух пучков

После математического моделирования был проведен экспериментальный процесс который показал что результаты экспериментов соответствуют ожидаемым результатам.

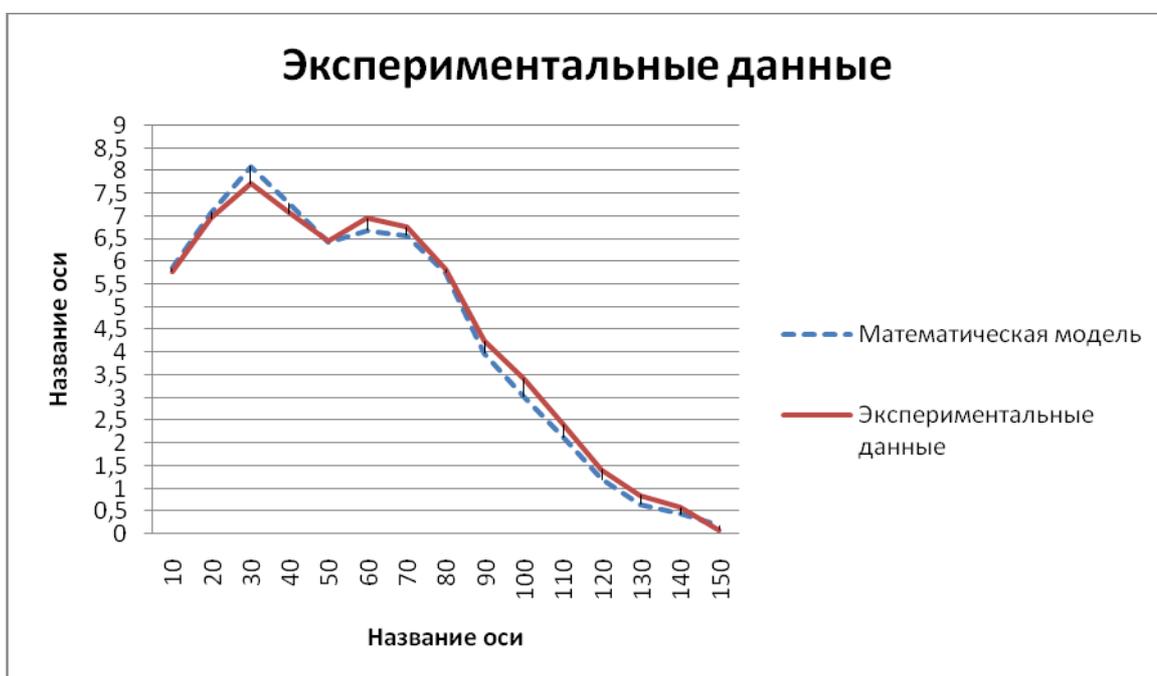


Рис. 5. Экспериментальные данные и математическая сумма двух пучков

Основные результаты работы

В работе были проанализированы основные виды плазменных процессов. С учетом результатов анализа была разработана классификация методов ионно-плазменной обработки.

Проведены исследования работы и взаимодействия протяженного источника ионов с короткой зоной ускорения, выявлены факторы влияющие на равномерность обработки всей площади поверхности подложки.

С учетом результатов исследований была разработана математическая модель взаимодействия двух параллельных пучков плазмы сформированных в протяженном источнике ионов с короткой зоной ускорения, работающие независимо друг от друга.

Список литературы

1. А.П. Достанко. Плазменная металлизация в вакууме / С.В. Грушецкий, Л.И. Киселевский и др.-Мн.: Наука и техника, 1983. -417 с.
2. А.В. Донской. Электроплазменные процессы и установки в машиностроении / В.С. Клубникин— Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1979. 221 с.
3. Л.С. Полак. Химия плазмы / Г.Б. Синярев, Д.И. Словецкий— (Низкотемпературная плазма. Т.3).-Новосибирск: Наука, 1991. -328с.
4. Дресвин С.В. Основы математического моделирования плазмотронов. Ч. 1: Уравнение баланса энергии. Метод контрольного объема. Расчет температуры плазмы: Учеб. Пособие /Д.В. Иванов -СПб: Изд-во Политехнического университета, 2004. 227 с.
5. Дресвин С.В. Основы математического моделирования плазмотронов. Ч. 3: Уравнение движения плазмы. Методика расчета скорости плазмы в плазматронах: Учеб. Пособие / Дресвин С.В., Нгуен Куок Ши, Иванов Д. В. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2006. 132 с.
6. Дресвин С.В. Основы математического моделирования плазмотронов. Ч. 2: Дресвин С.В. Электромагнитные задачи в плазмотронной технике: Учеб. пособие / Дресвин С.В., Иванов Д.В. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2006. - 296 с.
7. А.А. Овсянников. Диагностика низкотемпературной плазмы / В.С. Энгельшт, Ю.А. Лебедев и др. Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1994— (Низкотемпературная плазма. Т.9). - 485 с.
8. Физика и техника низкотемпературной плазмы / Под общей редакцией С.В. Дресвина. М., Атомиздат. 1972. - 352 с.

9. К.И. Билибин, А.И. Власов, Л.В. Журавлева и др. Конструкторско-технологическое проектирование электронных средств. /Под общ. редакцией Шахнова В.А. - М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2002. 500 с. (серия: Информатика в техническом университете).
10. Т.И. Агеева, А.И. Афонин, А.И. Власов и др. Информационные технологии в инженерном образовании/Под ред. Коршунова С.В., Гузненкова В.Н. – М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2007. – 432 с.: ил.
11. П.И. Варламов, К.А. Елсуков, В.В. Макарчук Технологические процессы в наноинженерии: учеб. пособие - М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2011. (Библиотека Наноинженерия»: в 17 кн. Кн.2). - 176 с.:ил.