

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Физический факультет

Петухов В.Ю., Гумаров Г.Г.

**ИОННО-ЛУЧЕВЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКИХ
ПЛЕНОК**

*(учебно-методическое пособие к практикуму по физике
поверхности и тонких пленок)*

Издание второе, исправленное и дополненное

Казань 2010

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Физического факультета Казанского государственного университета

УДК 539.21:539.12.04

Петухов В.Ю., Гумаров Г.Г. ИОННО-ЛУЧЕВЫЕ МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК. Учебно-методическое пособие для студентов физического факультета // Казань, 2010.- 87 с. Издание 2-е, исправленное и дополненное.

http://www.ksu.ru/f6/k5/bin_files/petukhov_ibm!33.pdf

Методическое пособие предназначено для студентов четвертого курса, приступивших к изучению спецкурса «Физика поверхности и тонких пленок». Во введении содержатся краткие сведения о тонких пленках и рассмотрены основные процессы, происходящие при их формировании. Кратко рассмотрены также основные методы их получения и приведены сравнительные характеристики этих методов. Подробно рассмотрены принципы действия и конструкции установок для магнетронного нанесения пленок, работающих на постоянном токе и с использованием ВЧ-распыления, и ионно-лучевому синтезу. Далее приведено описание лабораторных работ и порядок их выполнения.

Издание второе, исправленное и дополненное. Подготовлено для опубликования в электронном виде.

Рецензент: Таланов Ю.И. д.ф.-м.н., в.н.с. лаборатории Физики перспективных материалов Казанского физико-технического института КазНЦ РАН

© Физический факультет Казанского государственного университета, 2010

ВВЕДЕНИЕ: формирование тонких пленок

Тонкие пленки – это слои вещества толщиной от долей нанометра до нескольких микрометров, обладающие рядом особенностей атомно-кристаллической структуры, магнитных, электрических и других физических свойств.

В тех случаях, когда говорят о поверхности твердого тела, то обычно имеют в виду несколько самых верхних атомных слоев кристалла, т.е. область толщиной в несколько нанометров. При этом наличие поверхности может оказывать влияние на свойства и более глубоко лежащих слоев. Если свойства твердых тел во многих случаях можно описать, опираясь на тот факт, что расположение атомов в кристаллах обладает периодичностью в трех измерениях, то появление поверхности разрушает эту периодичность. Более того, в случае появления очень маленьких частиц, периодичность может нарушаться уже в трех измерениях. В последние годы бурно развивается такие направления научных и технологических исследований как «нанонаука» и «нанотехнология». Эти направления рассматриваются как основа новой промышленной революции.

В этой связи тонкие пленки, и в особенности - наноструктурированные тонкие пленки, играют очень важную роль в современной технике. Их значение в научно-техническом прогрессе чрезвычайно велико. Они используются в самых разнообразных областях науки и техники, например, в качестве защитных покрытий, для преобразования солнечной энергии в электрическую, в сверхпроводниковых приборах, в интегральной и функциональной микро- и наноэлектронике, компьютерной технике, в медицине, фармакологии, сельском хозяйстве и т.п.

Тонкие пленки – это особый вид состояния конденсированных веществ. Это обусловлено спецификой процесса их формирования: тонкие пленки получают конденсацией молекулярных или атомных потоков ве-

щества на поверхности, путем внедрения атомных частиц (ионов) в тонкий приповерхностный слой, химическим вакуумным осаждением, лазерной абляцией и др.

Формирование тонких пленок путем осаждения на поверхности включает несколько процессов, а именно: переход вещества из конденсированной фазы, которая может быть твердой или жидкой, в газообразную; перенос паров вещества в пространстве от испарителя к подложке (обычно при пониженном давлении); конденсация паров вещества при достижении подложки.

Первые два процесса существенно различаются для разных методов получения тонких пленок и будут отдельно рассмотрены для каждого способа нанесения. Здесь рассмотрим общие аспекты, характерные для конденсации пленок.

Кинетика процессов конденсации включает процессы адсорбции, зародышеобразования, роста и коалесценции новой фазы.

Адсорбция

Налетающий на поверхность подложки атом (или молекула) испытывает воздействие двух сил: силы притяжения Ван-дер-Ваальса и силы отталкивания. Потенциальная энергия взаимодействия падающего атома с атомами на поверхности в этом случае может быть записана в виде суммы:

$$E(r) = E_{\text{пр}}(r) + E_{\text{от}}(r) \quad (1)$$

и имеет вид, показанный на Рис.1.

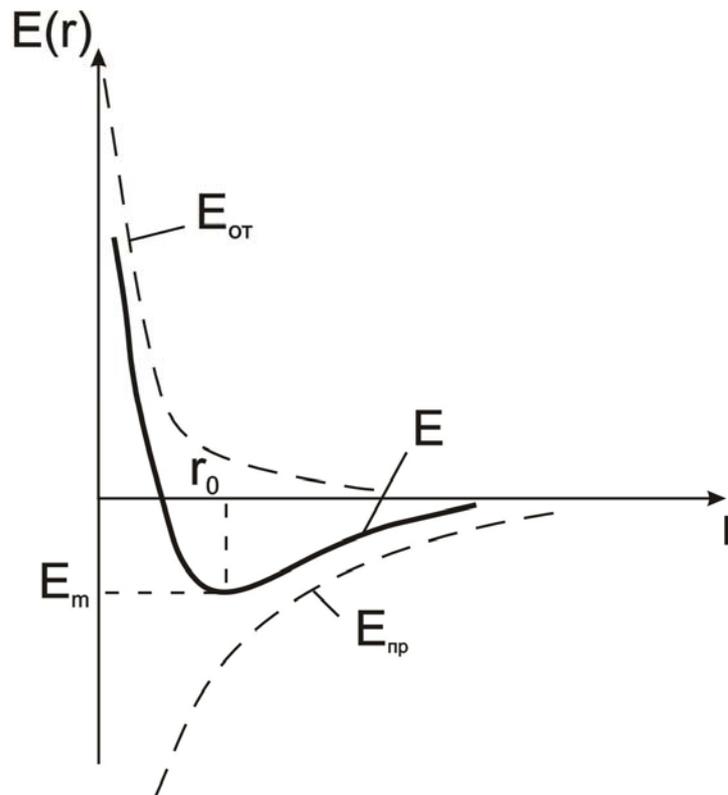


Рис.1. Зависимость энергии притяжения $E_{пр}$ и отталкивания $E_{от}$, а также полной потенциальной энергии E падающих атомов (сплошная линия) от расстояния до поверхности. Здесь E_m – энергия адсорбции, r_0 – расстояние минимума полной потенциальной энергии

Расстояние r_0 , соответствующее минимуму потенциальной энергии, является квазистабильным состоянием адсорбированного атома (адатома) на поверхности. В результате тепловых флуктуаций существует вероятность отрыва адатома от поверхности и его испарения. В этом случае среднее время жизни адатома может быть описано выражением:

$$\tau_a = \frac{1}{\nu_0} \exp \frac{\Delta E_m}{kT} \quad (2)$$

где ν_0 – частота тепловых колебаний адатома в узле кристаллической решетки ($\nu_0 = 10^{12} \dots 10^{14}$ Гц), ΔE_m – энергия адсорбции.

Величина ν_0 характеризует частоту попыток десорбции. Естественно предположить, что десорбция возникает в моменты, соответствующие максимальному смещению адатомов из положения равновесия. При этом адатом мигрирует по поверхности из одной потенциальной ямы в другую (Рис.2).

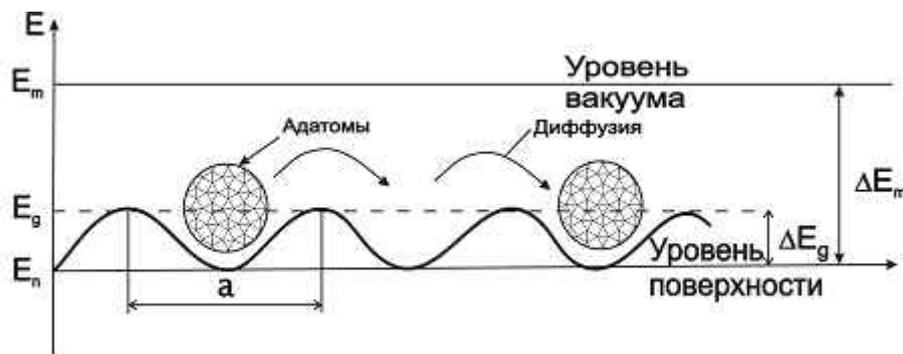


Рис.2. Потенциальный рельеф поверхности (сплошная линия) и возможные положения адатомов. E_n – уровень энергии атомов на поверхности; $\Delta E_g = E_g - E_n$ – энергия активации диффузии адатома на поверхности; ΔE_m – энергия адсорбции; E_m – уровень энергии в вакууме; a – расстояние между атомами на поверхности

В начальный период времени концентрация адатомов при осаждении возрастает, достигая значения n_a , пропорционального скорости осаждения (плотности потока атомов на поверхности) R :

$$n_a = R\tau_a = \frac{R}{\nu_0} \exp \frac{\Delta E_m}{kT} \quad (3)$$

Как видно из выражения (3), величина n_a для выбранной подложки и заданной скорости осаждения определяется главным образом температурой, и концентрация адатомов не должна увеличиваться, что не согласуется с экспериментом. Такое несоответствие объясняется тем, что адсорбированные атомы, мигрируя по поверхности, за время жизни успевают столкнуться друг с другом, образуя устойчивые скопления из адсорбиро-

ванных атомов или зародыши. При этом энергия десорбции такого зародыша возрастает на величину энергии химической связи адатомов в зародыше. Поэтому такие зародыши имеют большее время жизни и с большей вероятностью успевают присоединить к себе другие адатомы. Однако устойчивость небольших скоплений, состоящих из нескольких адатомов, определяется не только объемной энергией конденсации и поэтому должна быть рассмотрена отдельно.

Зародышеобразование

При образовании зародышей из отдельных атомов свободная энергия G_o всей системы с одной стороны уменьшается за счет образования химической связи между атомами ($\Delta G_v < 0$), т.е. пропорционально объему частицы, с другой – увеличивается за счет образования поверхности раздела зародыша ($\Delta G_{\pi} > 0$). Существует два возможных механизма образования зародышей:

- а) гомогенный механизм, характерный для зарождения в газовой фазе;
- б) гетерогенный механизм, который обычно реализуется при зарождении на поверхности подложки.

В случае гомогенного зарождения сферической частицы радиусом r можно записать для изменения ее свободной энергии ΔG_o :

$$\Delta G_o = \sigma_v \frac{4}{3} \pi r^3 + \sigma_n 4 \pi r^2 \quad (4)$$

где σ_v и σ_n – свободная удельная энергия (объемная и поверхностная, соответственно).

На Рис.3 показаны изменения поверхностной и объемной свободных энергий и энергии образования сферических зародышей в зависимости от их радиуса.

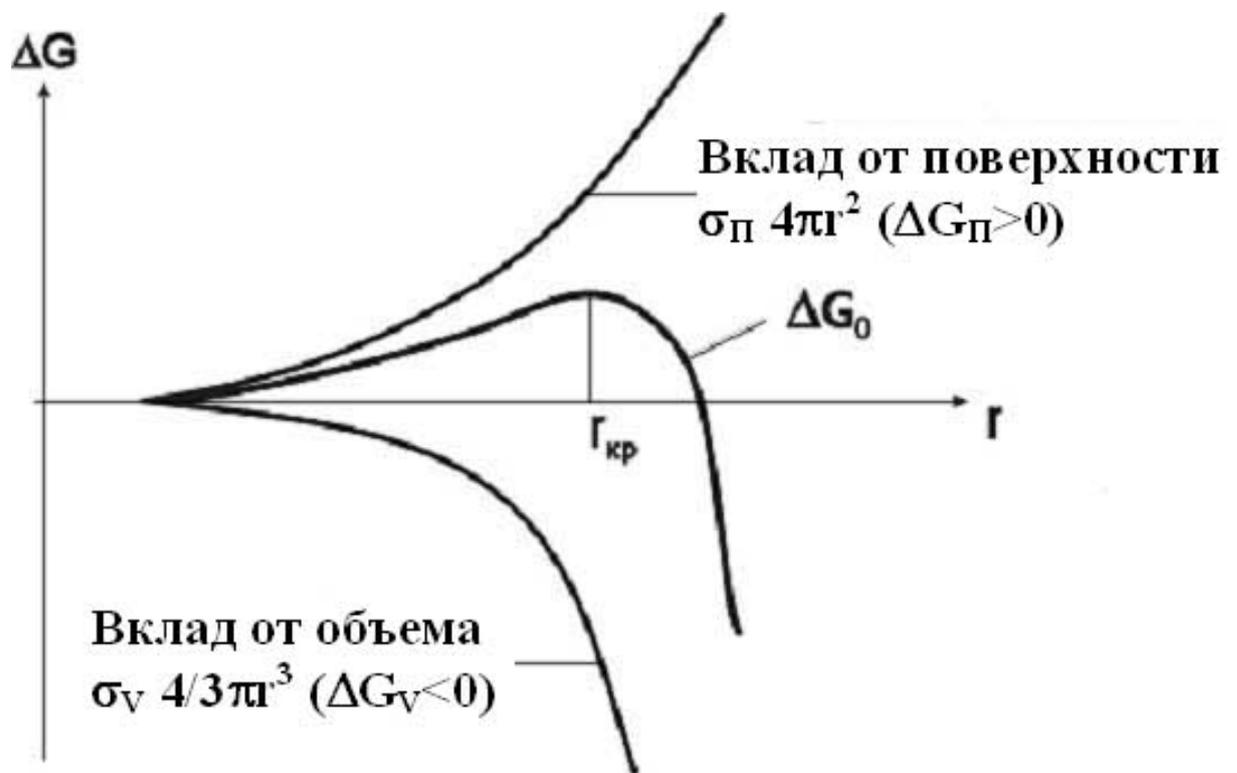


Рис. 3. Изменение энергии образования зародышей в зависимости от их радиуса и вкладов от поверхности и объема

Как видно из Рис.3, для образования частиц с размером, меньшим, чем $r_{кр}$, изменение свободной энергии ΔG_0 возрастает с увеличением r . Поэтому рост частиц энергетически не выгоден. Если же частица выросла до размера $r > r_{кр}$, то дальнейший рост сопровождается уменьшением полной свободной энергии. Значение $r_{кр}$ может быть найдено из условия: $\frac{\partial \Delta G_0}{\partial r} = 0$

Откуда

$$r_{кр} = -2 \frac{\sigma_n}{\sigma_v} \quad (5)$$

При гетерогенном зарождении необходимо учитывать взаимодействие частицы с атомами подложки. Наличие контакта с подложкой значительно снижает энергию образования зародышей и ускоряет зарождение. В этом

случае изменение поверхностной энергии зародыша по сравнению со свободной энергией его диссоциации может быть записано

$$\Delta G_{\Pi} = \sigma_{cv}S_{cv} + \sigma_{cs}S_{cs} - \sigma_{sv}S_{cs} \quad (6)$$

Здесь σ_{cv} , σ_{cs} , σ_{sv} – свободные энергии поверхностей раздела: конденсат-пар, конденсат-подложка, подложка-пар, соответственно; S_{cv} , S_{cs} – площади поверхностей зародыша с паром и с подложкой, соответственно. Последний член в уравнении (6) соответствует уменьшению свободной энергии вследствие исчезновения площади контакта поверхности S_{cs} с паром.

Поскольку $\sigma_{cv} < \sigma_{sv}$, а на поверхности обычно имеются дефекты в виде ямок или выступов, что увеличивает площадь поверхности под зародышем S_{cs} (см. Рис.4), то на таких дефектах энергия зародышеобразования уменьшается.

Рост новой фазы

Эксперимент показывает, что на начальном этапе роста пленки происходит неполная конденсация адатомов вследствие довольно интенсивного их переиспарения с поверхности. На первых стадиях конденсации зародыши разных размеров находятся в метастабильном равновесии с адсорбированными атомами. По мере роста зародышей окружающая их область (зона захвата) обедняется адатомами, и поэтому в ней затруднительно дальнейшее образование новых зародышей.

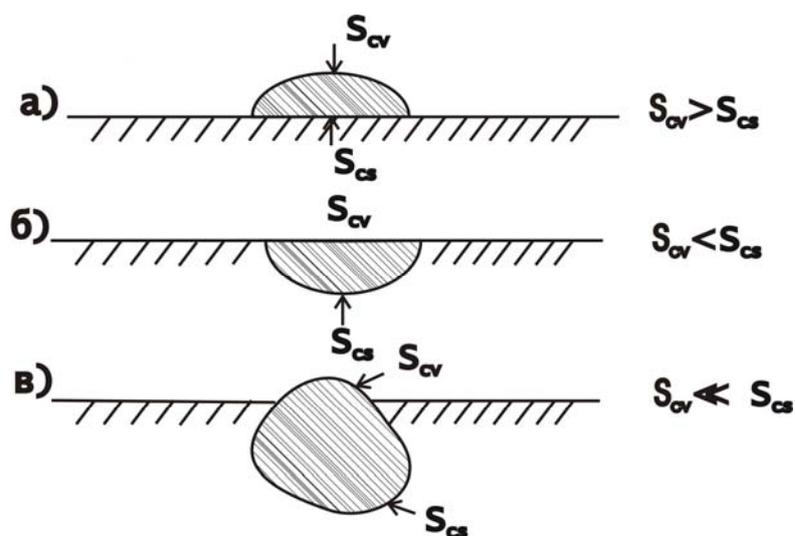


Рис.4. Образование зародыша на плоской поверхности (а) и на различных поверхностных дефектах (б, в)

Как следует из теории зародышеобразования, для того, чтобы конденсация пленки была устойчивой, необходимо преодолеть некоторый потенциальный барьер. В случае если этот барьер достаточно высокий, то на начальном этапе пленка будет состоять из малого числа больших зародышей и будет иметь островковый вид. В случае невысокого барьера зародышеобразования пленка будет состоять из большого числа маленьких зародышей, и эти островки будут срастаться уже на ранних стадиях осаждения, образуя непрерывную пленку.

Размер критического зародыша сильно зависит как от природы пленки и материала подложки, так и от условий осаждения, и в первую очередь, от температуры, поверхностной диффузии адатомов и скорости осаждения. Рассмотрим подробнее эти зависимости.

1. Известно, что теплота испарения (или теплота сублимации) пропорциональна температуре кипения. Поэтому для материалов с высокой температурой кипения (например, W, Mo, Ta) величина ΔG_v также велика, и даже очень маленькие зародыши являются устойчивыми в отличие от, например, металлов с низкой температурой кипения (Cd, Mn,

Zn), для небольших зародышей которых процесс переиспарения становится весьма вероятным.

2. Из уравнений (4) и (6) видно, что при прочих равных условиях критические зародыши должны иметь большие размеры, если поверхностная энергия конденсируемого материала σ_{cv} велика, а материала подложки σ_{sv} - мала.
3. Способность адатомов диффундировать и сталкиваться друг с другом будет влиять на скорость образования критического зародыша. Если энергия активации поверхностной диффузии очень велика, то диффузионная длина будет малой, и зародыш сможет расти только за счет материала, непосредственно попадающего на него из газовой фазы.
4. Зависимость размера критического зародыша от температуры можно получить, дифференцируя уравнение (5) по температуре, учитывая тот факт, что σ_v и σ_n являются функциями температуры. Из зависимости $r_{кр}=r_{кр}(T)$ следует, что увеличение температуры подложки при постоянной скорости осаждения приводит к увеличению размера критического зародыша.
5. Зависимость $r_{кр}$ от скорости осаждения обусловлено тем, что от этой скорости зависит ΔG_v . При этом увеличение скорости осаждения приводит к увеличению скорости зародышеобразования и, следовательно, к образованию более мелких островков.

Таким образом, тенденция к образованию островковой структуры усиливается:

- при высокой температуре подложки;
- в материале с низкой температурой кипения;
- при низкой скорости осаждения;
- при слабой связи между пленкой и подложкой;
- при высокой поверхностной энергии в материале пленки;

- при низкой поверхностной энергии подложки.

Стадии процесса роста пленки

При рассмотрении процесса роста пленки обычно выделяют 4 стадии.

А. Образование островковой пленки

Зародыши, обычно возникающие в результате флуктуационных процессов, растут в трех измерениях, однако рост в направлениях, параллельных подложке, происходит быстрее, чем по нормали. Это объясняется тем, что рост происходит, в основном, за счет поверхностной диффузии адатомов по подложке, а не за счет прямого соударения с атомами в паровой фазе.

Б. Коалесценция островков

Коалесценция (срастание) зародышей характеризуется уменьшением полной площади проекции зародышей на подложку и увеличением их по высоте. Схема коалесценции островков приведена на Рис.5.

Процесс коалесценции подобен процессам слияния капель в жидкости: он приводит к увеличению свободной поверхности подложки, образованию вторичных зародышей между островками и, соответственно, к уменьшению общей поверхности островков, участвующих в их слиянии.

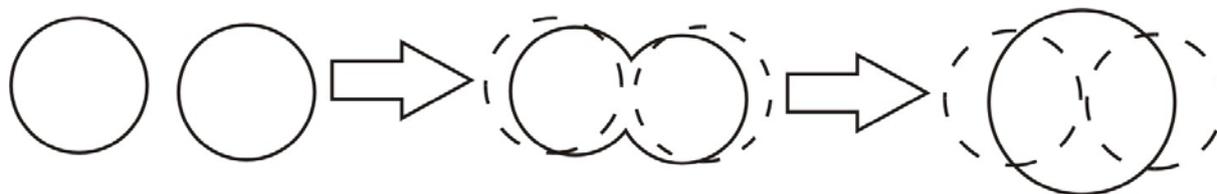


Рис.5. Схема изменения формы сферических островков в процессе коалесценции

Основным механизмом переноса массы при коалесценции является поверхностная диффузия, которая проявляется тем сильнее, чем меньше частицы.

Движущей силой коалесценции является результирующее уменьшение поверхностной энергии. Если поверхностная энергия не зависит от ориентации кристалла, площадь поверхности будет стремиться уменьшиться до минимума. Дополнительное уменьшение свободной энергии при коалесценции может происходить за счет образования граничных плоскостей с предпочтительной кристаллографической ориентацией, что приводит к образованию островков с хорошо развитой кристаллографической огранкой (см. Рис.6а и б).

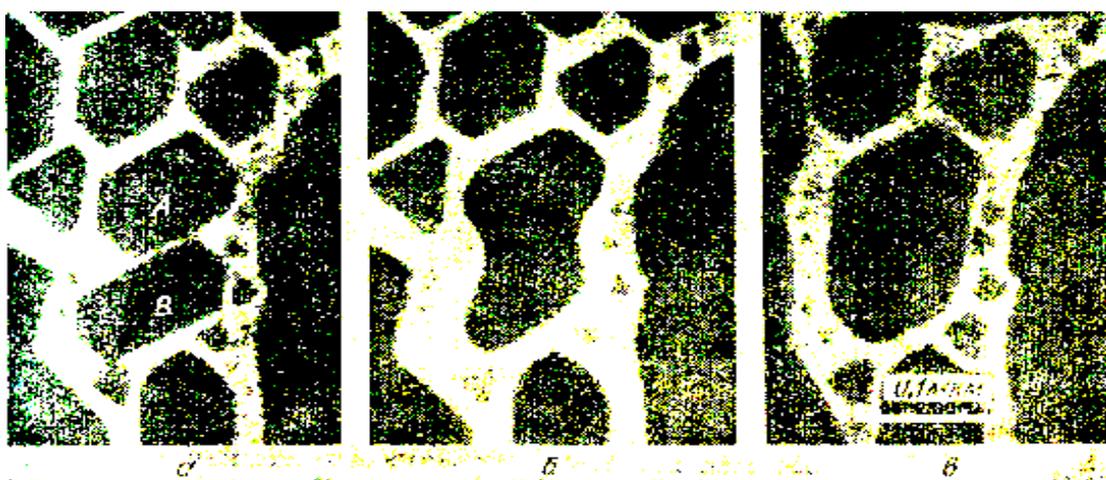


Рис.6. Электронные микрофотографии последовательного роста пленки золота во время коалесценции и после нее

В. Образование сетчатой структуры

По мере роста островков тенденция к тому, что после срастания они становятся совершенно круглыми, уменьшается. Островки вытягиваются и стремятся образовать непрерывную сетчатую структуру, в которой конденсированный материал разделен длинными узкими каналами неправильной формы шириной от 5 до 20 нм. Затем в каналах образуются мостики, с которых начинается быстрое заполнение канала. Процессы быстрого ис-

чезновения каналов аналогичны процессам, происходящим в жидкости, и являются проявлением одного и того же физического эффекта, а именно, минимизации полной поверхностной энергии нарастающего материала путем ликвидации областей с высокой кривизной поверхности (см. Рис.6.в).

Г. Формирование сплошной пленки

В процессе роста пленки, особенно при коалесценции, происходят заметные изменения ориентации островков. Это особенно важно для эпитаксиального роста пленок. Общий механизм роста поликристаллических слоев похож на механизм роста эпитаксиальных пленок¹, за исключением того, что срастающиеся островки в этом случае имеют произвольную относительную ориентацию, подчиняющуюся случайному закону распределения. Основным фактором, определяющим размер зерен в готовой пленке, является не первоначальная концентрация зародышей, а процесс рекристаллизации, происходящий при коалесценции зародышей или островков.

Основные методы получения тонких пленок

Методы получения тонких пленок весьма разнообразны: электролитическое осаждение металлов и сплавов, вакуумное испарение с последующей конденсацией на подложку, катодное распыление мишени, выращивание из раствора-расплава, метод газотранспортных реакций, ионная имплантация и др. В тонкопленочной *вакуумной технологии* наибольшее распространение получили методики, которые можно подразделить на две группы:

I. Испарение.

II. Ионное распыление.

¹ Эпитаксия – ориентированный рост одного кристалла на поверхности другого. Ориентированный рост кристалла внутри объема другого называется мезотаксией (или эндотаксией).

I. Основным методом *в первой группе* является метод термического вакуумного напыления. Этот метод характеризуется простотой и высокой скоростью осаждения. Сущность метода заключается в нагреве вещества в вакууме до температуры, при которой кинетическая энергия атомов и молекул вещества становится достаточной для их отрыва от поверхности мишени и движения в пространстве до мишени. Это происходит при такой температуре, при которой давление собственных паров вещества превышает на несколько порядков давление остаточных газов. При этом атомарный поток распространяется прямолинейно, и при столкновении с поверхностью испаряемые атомы и молекулы конденсируются на ней.

Главными преимуществами этого метода является его простота, доступность и высокая скорость осаждения, что обусловило его широкое использование в тонкопленочной технологии.

Однако термовакuumное испарение применяется обычно для испарения металлов, достаточно летучих при температурах до 1800 К. Кроме того, пленки, полученные термическим вакуумным напылением, имеют, как правило, неоднородный химический состав (особенно при напылении из сплавов) и недостаточную стабильность.

Электронно-лучевое испарение. Обычно для нагрева испаряемого вещества используют нагрев электрическим током. Иногда, особенно для тугоплавких (труднолетучих) металлов, используют также электронно-лучевое испарение. Электронно-лучевой нагрев также обеспечивает высокую скорость осаждения, но характеризуется низким коэффициентом полезного использования материала (<20%) и очень низким энергетическим КПД (1...5%), поскольку основная часть энергии расходуется на нагрев тигля, рентгеновское и УФ излучение, а также образование вторичных электронов (до 25% энергии первичного пучка). При этом вторичные электроны бомбардируют подложки, на которые наносятся пленки, нагревая их

вплоть до 1000К и вызывая образование радиационных дефектов в формирующейся пленке.

Нагрев материала для испарения можно осуществлять также и другими энергетическими воздействиями, например, ВЧ или СВЧ-излучением, мощными световыми пучками, в частности, лазерными (лазерная абляция) и др.

II. Существует несколько методов ионного распыления, для каждого из которых используется своя распылительная система.

Катодное распыление (ионное распыление). Данный метод основан на явлении разрушения катода при бомбардировке его ионизированными атомами разряженного газа. Атомы, вылетающие с поверхности катода при его распылении, распространяются в окружающем пространстве и конденсируются на подложке. При подаче постоянного напряжения между катодом и анодом (~1...5 кВ), находящимися в газе при небольшом давлении (~10 Па), возникает тлеющий разряд. Образующиеся при этом ионы бомбардируют катод и вызывают распыление атомов мишени (или даже более крупных частиц – кластеров).

Методы получения пленок ионным распылением материала мишени обладают рядом преимуществ перед другими методами.

- Поскольку распыление является низкотемпературным процессом, то в качестве исходной мишени можно использовать тугоплавкие материалы и синтезировать соединения, которые практически невозможно получить термическим испарением.
- Наносимые пленки имеют высокую адгезию к подложке.
- Постоянство химического состава распыляемого материала обеспечивает однородность пленки по толщине.

- Большие, чем при термическом испарении, площади поверхности получаемых пленок, поскольку материал напыляется на подложку не из точечного источника.
- Высокий коэффициент использования распыляемого материала.

Ионно-плазменное распыление. Ионно-плазменный метод нанесения пленок отличается от катодного распыления тем, что распыление мишени производится не ионами, возникающими в тлеющем разряде, а мощным пучком ионов из специального ионного источника. Большим преимуществом ионно-плазменного напыления является его универсальность. С помощью этого метода можно распылять как тугоплавкие металлы, например, вольфрам, так и различные сплавы без изменения их состава. Пленки сложного состава можно изготавливать одновременным распылением нескольких независимых мишеней. При этом скорость напыления из каждой мишени можно регулировать независимо друг от друга.

Магнетронное распыление. Этот метод нанесения пленок является дальнейшим развитием ионно-плазменного напыления. Он основан на распылении материала за счет бомбардировки поверхности мишени ионами рабочего газа (обычно аргона), образующимися в плазме аномального тлеющего разряда. Для повышения эффективности ионизации рабочего газа и создания над поверхностью катода-мишени области плотной плазмы разряд возникает в неоднородных скрещенных электрическом и магнитном полях. Среди рассмотренных методов этот метод имеет более широкие возможности применения и является наиболее перспективным. Магнетронное распыление можно осуществлять как на постоянном, так и на переменном токе.

Ионно-лучевой синтез. Ионно-лучевой синтез основан на получении тонких пленок с применением ионной имплантации. В отличие от других ионно-плазменных методов получения пленок, при ионно-лучевом синтезе

энергия внедряемых ионов достаточно велика: она составляет от десятков кэВ до единиц МэВ, а иногда и выше. При этом доза внедряемых ионов – более 10^{16} ион/см², т.е. такая, чтобы концентрация имплантированных атомов была достаточной для формирования необходимого количества новой фазы. При этом конкретное значение дозы выбирается, исходя из задаваемой структуры синтезируемой пленки (толщина, фазовый состав, сплошность и т.п.)

Синтезируемые фазы формируются в тонком приповерхностном слое (<1мкм) в аморфном или кристаллическом состоянии непосредственно в процессе имплантации. Часто для кристаллизации и улучшения структуры синтезируемого соединения или для проведения последующих химических реакций дополнительно используют термический или импульсный световой, электронный, ионный и другие виды отжига.

В таблице 1 приведены преимущества и недостатки основных методов получения тонких пленок.

Таблица 1. Преимущества и недостатки основных методов получения тонких пленок

Метод	Преимущества	Недостатки
1. Вакуумное напыление с резистивным испарителем	Простое оборудование для легкоплавких материалов	Сплавление с материалом испарителя
2. Вакуумное напыление с электронно-лучевым испарителем	Позволяет получать аморфные пленки одноэлементных полупроводников	Трудно испарять тугоплавкие металлы, углерод и окислы
3. Химическое осаждение из паровой фазы	Дает высококачественные приборы, эпитаксиальные слои для активных приборов, можно наносить поликристаллические слои	Сложное оборудование. Требуется точное задания скорости газового потока; высокая температура подложки
4. Электрохимическое осаждение	Широкий диапазон пленок; большая площадь, одно-	Применим лишь для металлических пленок

	родная по толщине	нок; проблема примесей
5. Молекулярно-лучевая эпитаксия	Дает высококачественные эпитаксиальные пленки различных соединений	Сложное оборудование; низкая скорость осаждения
6. Катодное распыление	Позволяет в качестве исходной мишени использовать тугоплавкие материалы. Большие площади поверхности получаемых пленок.	Недостаточно высокое качество пленок
7. Ионно-плазменное распыление	Пригоден для проводящих материалов и для изоляторов. Позволяет получать аморфные пленки металлов и полупроводников.	Атомы распыляющего газа Ar внедряются в подложку; подложка обычно сильно разогревается; материал пленки перемешивается с материалом подложки
8. Магнетронное распыление на постоянном токе	Высокая скорость осаждения.	Большие трудности при распылении диэлектрических материалов.
9. ВЧ-магнетронное нанесение	Позволяет получать практически любые пленки, как на диэлектрических, так и металлических подложках	Трудности при приготовлении мишеней.
10. Ионно-лучевой синтез	Малое время процесса введения примесей, чистота технологии, низкая температура мишени, возможность создания мезотаксиальных слоев.	Сложное и дорогостоящее оборудование. Только субмикронная толщина пленок.

Литература

1. Оура К. Введение в физику поверхности /К.Оура, В.Г.Лифшиц, А.А.Саранин, А.В.Зотов, М.Катаяма; Ин-т автоматике и процессов упр. ДВО РАН.- М.: Наука, 2006.- 490 с.
2. Рамбиди Н.Г., Березкин А.В. Физические и химические основы нанотехнологий.- М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.- 456 с.
3. А.И.Гусев. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнология. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.- 416 с.
4. Вудраф Д., Делчар Т. Современные методы исследования поверхности: Пер. с англ.- М.: Мир, 1989.- 564 с.
5. М.Б.Гусева. Ионная стимуляция в процессах образования тонких пленок на поверхности твердого тела. Соросовский образовательный журнал. – 1998.- №10.- С.106-112.
6. Ефимов И.Е., Козырь И.Я., Горбунов Ю.И. Микроэлектроника.- М.: Высшая Школа, 1986.- 464 с.
7. Черняев В.Н., Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. – М.: Радио и связь, 1987.- 464 с.
8. Технология тонких пленок. Справочник. Т1/ Под ред.Л.Майсела, Р.Гленга. М.: Сов.радио, 1977.- 664 с.
9. Кузьмичев А. Магнетронные распылительные системы. Книга 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. М.:Аверс, 2008. – 244 с.

Лабораторная работа 1. Метод магнетронного распыления на постоянном токе

Принцип действия

Основным элементом магнетронных распылительных систем (МРС) являются катод-мишень, анод и магнитная система. Существует большое число разнообразных распылительных систем, которые могут быть подразделены на 3 основных типа: системы с цилиндрическим катодом, системы с плоским катодом и кольцевым катодом S-типа.

Рассмотрим принцип действия на примере магнетрона с плоской мишенью (Рис.7).

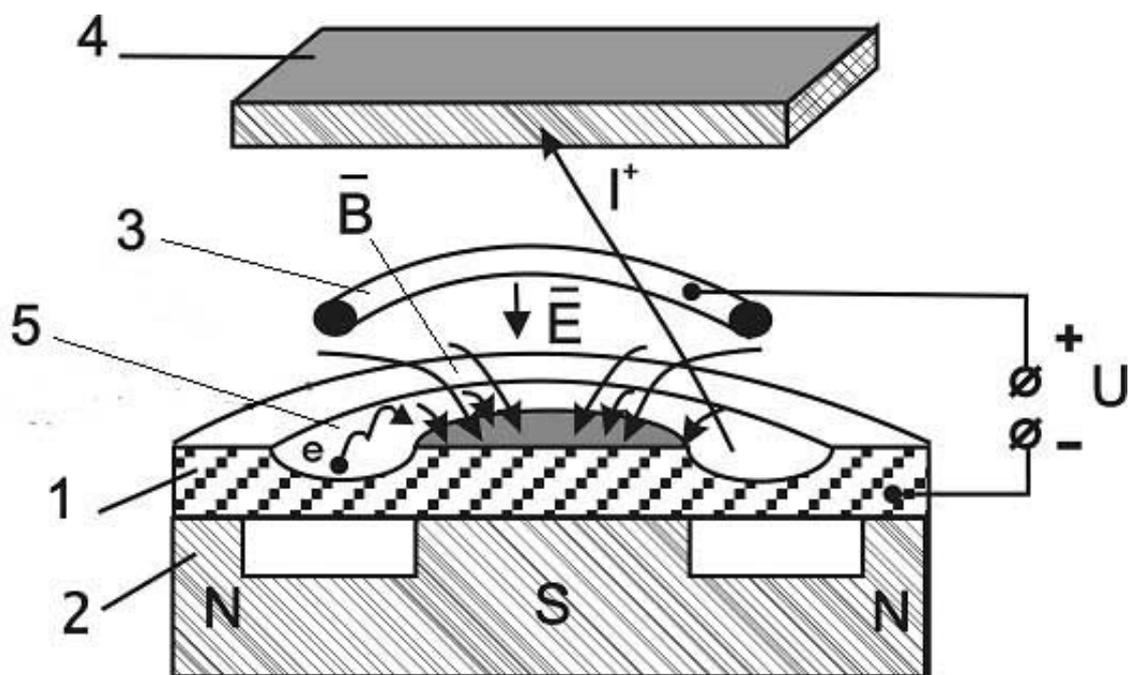


Рис.7. Схема магнетронной распылительной системы с плоским катодом:

- 1 – катод-мишень;
- 2 – магнитная система;
- 3 – анод;
- 4 – подложка;
- 5 – зона распыления

При подаче постоянного напряжения между анодом (3) и катодом (1) в области между ними возникает неоднородное электрическое поле E , которое возбуждает аномальный тлеющий разряд в среде рабочего газа (обычно чистого Ar). Образующиеся ионы бомбардируют катод. Бомбардировка катода ионами приводит к двум основным эффектам: эмиссии электронов и распылению поверхности катода-мишени. Эмитированные с катода под действием ионной бомбардировки электроны ускоряются электрическим полем \vec{E} и начинают двигаться по направлению к аноду. При наличии магнитного поля \vec{B} на заряженную частицу с зарядом q , движущуюся со скоростью \vec{v} , действует сила Лоренца

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v} \vec{B}], \quad (7)$$

которая изменяет направление движения электронов. При этом электроны начинают двигаться по сложным циклоидальным траекториям у поверхности катода-мишени. Электроны оказываются как бы в ловушке, создаваемой действием двух составляющих силы F , обусловленных с одной стороны электрическим, с другой – магнитным полем. При своем движении электроны совершают по нескольку ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа до тех пор, пока не аннигилируют с ионами плазмы. Такое циклоидальное движение электронов существенно увеличивает эффективность процесса ионизации, причем максимальная плотность плазмы оказывается сконцентрированной около поверхности катода-мишени в области между полюсами магнитного поля. Это обуславливает увеличение интенсивности ионной бомбардировки поверхности мишени и значительный рост скорости распыления, а, в конечном итоге, скорости осаждения атомов на поверхности подложки (4). В результате этого на поверхности катода образуется канавка (5) (эрозия поверхности).

Важным достоинством метода магнетронного распыления является отсутствие бомбардировки подложки высокоэнергетичными вторичными электронами из-за их захвата магнитной ловушкой. Это позволяет избежать перегрева поверхности подложки (4), и, следовательно, дает возможность напылять пленки на материалы с низкой термостойкостью, причем с высокой скоростью осаждения. Этот факт имеет большое значение для современных технологий ввиду широкого использования полимеров и композитных материалов. В частности, в микроэлектронике и компьютерной технике широко используются такие материалы как полиметилметакрилат (ПММА), полиимид, полиэтилентерефталат, металлополимерные пленки и т.п., имеющие температуры размягчения и деструкции в диапазоне от 70 до 250°C.

Для магнетронных систем основными источниками нагрева подложки становятся:

- ✓ кинетическая энергия осаждаемых атомов (5 – 20 эВ/атом);
- ✓ энергия конденсации распыленных атомов (3-9 эВ/атом);
- ✓ излучение плазмы (2-10 эВ/атом²).

Суммарная тепловая энергия, рассеиваемая на подложке, а, следовательно, и температура подложки зависят не только от конструкции и режимов распылительной системы, но и, в большой степени, от распыляемого материала. Типичные значения суммарной тепловой энергии изменяются от 10 до 70 эВ/атом, а температура подложки при этом, в зависимости от осаждаемых атомов, находится в пределах от 70 до 200°C.

Вольтамперная характеристика разряда

Одной из основных характеристик разряда является вольтамперная характеристика (ВАХ). Существенное влияние на нее оказывает рабочее

² Имеется ввиду величина энергии излучения плазмы, полученная подложкой за время осаждения одного атома.

давление и индукция магнитного поля. Типичные ВАХ магнетронных систем приведены на Рис.8. Как видно, существенное влияние на них оказывают рабочее давление P и индукция магнитного поля B .

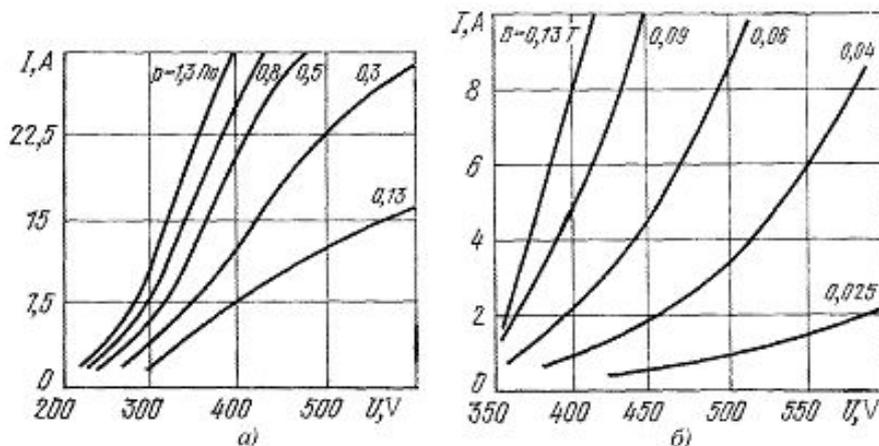


Рис.8. Вольтамперные характеристики магнетронных распылительных систем с алюминиевой мишенью: а) при различном давлении и постоянном магнитном поле $B = 0,03$ Тл; б) при различной индукции магнитного поля и постоянном давлении $P = 0,3$ Па

С увеличением давления ВАХ сдвигаются в область меньших рабочих напряжений и приближаются к линейной зависимости. Аналогичным образом влияет и индукция магнитного поля. Близкие к линейной зависимости наблюдаются при больших значениях магнитного поля. Следует отметить также, что на ВАХ разряда также влияют материал мишени и ее форма, которая видоизменяется по мере распыления материала (см. Рис.9). Так, образование выемки в плоской мишени приводит к сдвигу ВАХ в область меньших рабочих напряжений из-за улучшения условий локализации плазмы, причем этот сдвиг растет с увеличением P .

Процесс ионного распыления материала мишени зависит от множества факторов: энергии, массы, атомного номера и угла падения бомбардирующих ионов; массы и атомного номера распыляемых атомов; температуры и качества обработки поверхности мишени и др. На эффективность

распыления оказывает влияние также и величина давления рабочего газа. Очевидно, что при некотором пороговом давлении распыление начинает уменьшаться.

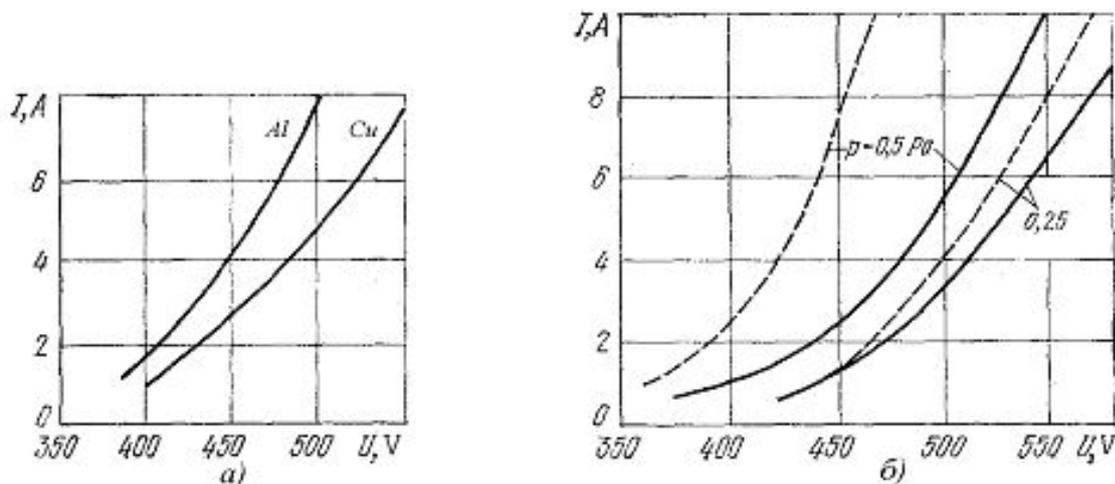


Рис. 9. ВАХ магнетронной системы распыления: а) с плоской мишенью из различных металлов при $P = 0,5 \text{ Па}$ и $B = 0,08 \text{ Тл}$; б) с конической новой (сплошные линии) и эродированной (штриховые линии) мишенями при $B = 0,06 \text{ Тл}$ и различном давлении

Это объясняется увеличением вероятности возвращения распыленных атомов на мишень при увеличении давления вследствие процессов обратной диффузии и обратного рассеяния. Под обратной диффузией следует понимать возвращение на мишень распыленных атомов, имеющих среднюю кинетическую энергию, равную средней кинетической энергии атомов рабочего газа. Такое возвращение может происходить с расстояний, значительно превышающих длину свободного пробега распыленных атомов λ_a . Обратное рассеяние представляет собой возвращение распыленных атомов на мишень в результате рассеяния на атомах рабочего газа. Этот процесс происходит на расстояниях, не превышающих λ_a , и характеризуется различием кинетических энергий и масс соударяемых частиц. В зависимости от соотношения масс атомов распыляемого материала и атомов ра-

бочего газа преобладает тот или иной процесс возвращения распыленных атомов на мишень.

Магнетронная распылительная система ВУП-5М

Вакуумный универсальный пост ВУП-5М предназначен для получения пленок из различных материалов методом магнетронного распыления.

Прибор выполнен одной стойкой, в которой размещены рабочая камера, вакуумная система, блоки питания, пульта управления.

В рабочей камере установлены три магнетронных распылителя с плоской мишенью, схематическое изображение которых показано на Рис.7, с той лишь разницей, что зона распыления замыкается в окружность (Рис.10).

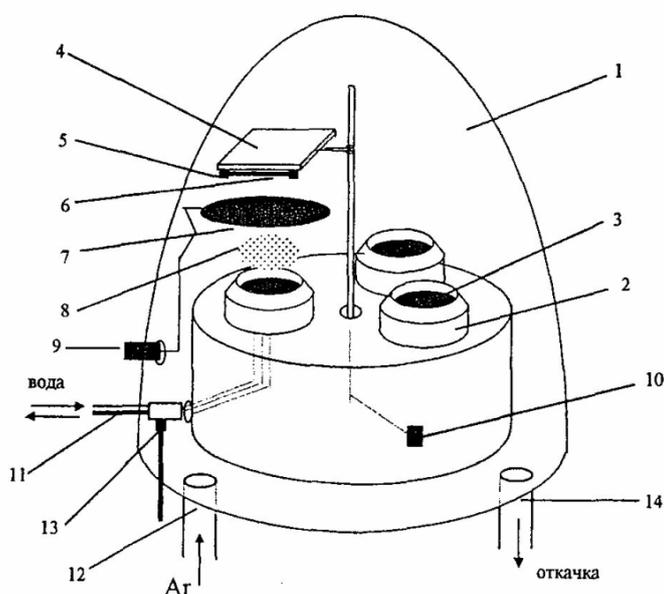


Рис.10. Рабочая камера магнетронной распылительной системы ВУП-5М: 1 - рабочий объем; 2 - магнетрон; 3 - съемная мишень; 4 - подложкодержатель; 5 - зажим; 6 - подложка; 7 - заслонка; 8 - плазма тлеющего разряда; 9 - ручка для вращения заслонки в рабочем объеме; 10 - ручка для вращения подложкодержателя в рабочем объеме; 11 - водяной шланг; 12 - кран напуска рабочего газа; 13 - высоковольтный ввод; 14 - откачка диффузионным насосом

Перед напылением на магнетрон (2) устанавливают катод-мишень (3), закрепляют подложку (6) на держателе (4), проверяют работу заслонки (7) и

откачивают вакуумную камеру до $\sim 10^{-4}$ Па. С помощью крана (12) напускают рабочий газ аргон, обычное рабочее давление которого равно $(0,5 \div 5) \cdot 10^{-5}$ Па. На катод подают отрицательное напряжение относительно анода.

Основные параметры и характеристики МРС ВУП-5М:

- остаточное давление в камере, создаваемое диффузионным насосом при работающей азотной ловушке — $1,3 \cdot 10^{-4}$ Па;
- максимальное напряжение на выходе высоковольтного выпрямителя источника питания магнетрона - не менее 0,9 кВ;
- максимальный ток магнетрона - не менее 300 мА;
- температура подложки - до 1000 °С;
- время нагрева подложки - не более 30 мин;
- время смены подложек не более 7 сек, скорость вращения подложек не менее 0,5 сек.

Управление магнетронной системой ВУП-5М производится с пульта управления. С помощью пульта обеспечивается выход в рабочий режим вакуумной системы из холодного состояния и коммутация вакуумной системы во время работы. Схема вакуумной коммутации ВУП-5М приведена на Рис. 11.

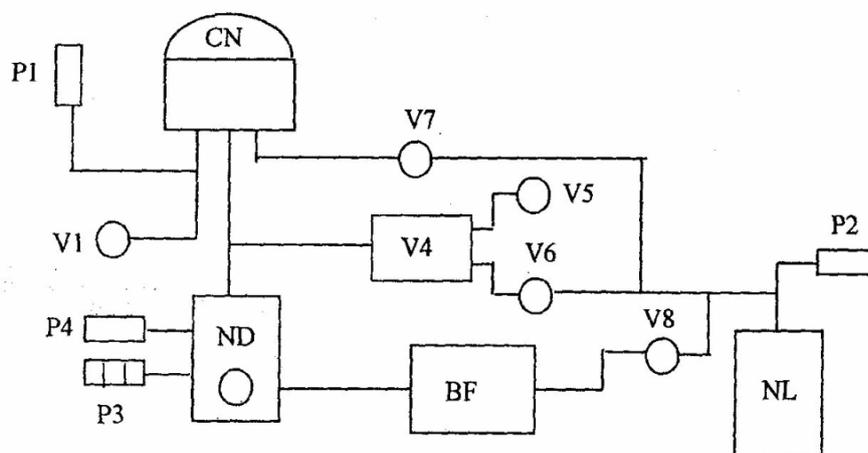


Рис.11. Схема вакуумной коммутации ВУП-5М: CN - объем рабочий; ND - насос

диффузионный; NL - насос форвакуумный; BF - баллон форвакуумный; VI...V8 - клапаны коммутации вакуумной системы; P1, P2, P4 - датчики терморезисторные ПМТ-2; P3 - датчик ионизационный ПМИ-2

Задание и порядок работы на установке ВУП-5М

Задание

1. Изучить устройство и принцип действия магнетронной распылительной системы ВУП-5М.
2. Освоить порядок выполнения технологических операций по изготовлению тонких пленок методом магнетронного распыления на установке ВУП-5М.
3. Получить экспериментальную ВАХ разряда магнетронной системы и проанализировать ее.
4. Получить несколько образцов, используя в качестве мишени предложенные материалы.
5. Определить толщину, равномерность пленки по толщине, скорость напыления.

1. Подготовка установки ВУП-5М к напылению

- 1.1. Включить общий рубильник 380 В.
- 1.2. Открыть воду через диффузионный насос ВУП-5М, проверить ее наличие.
- 1.3. Нажать кнопку "СЕТЬ" на блоке управления.
- 1.4. Нажать кнопку НФ (насос форвакуумный).
- 1.5. После достижения вакуума $1,5 \cdot 10^{-1}$ мм рт.ст. на форвакуумном насосе (на индикаторе вакуума нажата кнопка "Д2") нажать кнопку "BF" для предварительной откачки буферного баллона.
- 1.6. После достижения вакуума $1,5 \cdot 10^{-1}$ мм рт.ст. в буферном баллоне (на индикаторе вакуума нажата кнопка "Д4") включить диффузионный насос нажатием кнопки "НД" на пульте управления.

1.7. После разогрева диффузионного насоса (~45 мин) залить азот в азотную ловушку.

2. Установка подложек

2.1. Напустить воздух в рабочий объем (РО) нажатием кнопки "НВ" на блоке управления (либо на выносном пульте).

2.2. Откинуть колпак РО.

2.3. Установить подложки на держатель под руководством лаборанта.

2.4. Установить мишень распыляемого вещества на катод магнетронной системы.

2.5. Проверить работоспособность заслонки.

2.6. Закрыть колпак РК.

3. Откачка

3.1. Открыть байпасный клапан нажатием кнопки "ПВ".

3.2. Для контроля вакуума в камере нажать кнопку "Д2" секции "индикация" блока управления.

3.3. Ждать достижения значения вакуума $(6-8) \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст. (на индикаторе сигнал будет больше 230 дел.).

3.4. Открыть затвор нажатием кнопки "ВВ" выносного пульта.

3.5. Ждать достижения вакуума $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст. (на индикаторе сигнал будет более 999 дел.).

3.6. Включить ионизационный датчик измерения давления в камере. Для этого нажать вместе кнопки "эмис" и "накал". Ждать 5-10 мин. прогрева ионизационного датчика.

3.7. Для контроля вакуума отжать кнопки "эмис" и "накал" и выбрать необходимый диапазон давлений 10^{-5} или 10^{-7} на секции "индикация".

3.8. Ждать достижения необходимого значения вакуума в объеме.

- 3.10. Прокачать аргоновую магистраль, последовательно открыв пьезоэлектрический натекаТЕЛЬ и следующие краны вплоть до редуктора. Для открытия пьезоэлектрического натекаТеля нажать кнопку "травление вкл" секции "режим" и вывести ручку "ток ИТр" по часовой стрелке до упора.
- 3.11. При открытой магистрали ждать откачки до необходимого значения вакуума в камере.

4. Напыление

- 4.1. Регулятором напряжения установить, по значению ЭДС термопары, необходимую температуру подложек.
- 4.2. Перед напуском газа закрыть пьезоэлектрический натекаТЕЛЬ поворотом ручки "ток ИТр" против часовой стрелки до упора и отжав кнопку "травление вкл " секции "режим".
- 4.3. Открыть кран баллона с помощью редуктора, выставить стрелку расходомера на значение в области от 5 до 10 л/мин (под руководством лаборанта).
- 4.4. Нажать кнопку "травление вкл" секции "режим" и с помощью потенциометра "ток ИТр" и заслонки над диффузионным насосом выставить давление аргона в камере на уровне $(1 \div 4) \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст. (на индикаторе 650-320 дел). Давление фиксируется датчиком "Д1".
- 4.5. Подать высокое напряжение на магнетрон, нажав следующие кнопки секции "режим": мощность "вкл"; испаритель "ИТр".
- 4.6. С помощью ручки потенциометра "мощность 1" выставить необходимое напряжение, фиксируемое на стрелочном индикаторе "напряжение".
- 4.7. Выставить ток разряда с помощью стрелочного индикатора "ток".
- 4.8. С помощью регулирования давления и мощности откорректировать режим напыления и зафиксировать его стабильное положение, сохра-

няющееся в течение не менее 1 мин.

- 4.9. Открыть заслонку, включить секундомер.
- 4.10. По завершении процесса напыления закрыть заслонку. С помощью ручки "мощность 1" снять напряжение, выключить кнопку мощность "вкл".
- 4.11. Закрыть редуктор баллона с аргоном.
- 4.12. Выключить нагреватель подложки в обратной последовательности.
- 4.13. Прокачать аргоновую магистраль до значения, соответствующего начальному вакууму.
- 4.14. Закрыть магистраль в обратной последовательности (от баллона к пьезоэлектрическому натекателю).
- 4.15. Ждать остывания подложки до необходимой температуры (обычно до $T < 80$ °С).

5. Извлечение образцов из РО

- 5.1. Нажать кнопку "НВ" либо на пульте, либо на блоке управления.
- 5.2. Откинуть колпак РК, вынуть подложки и контрольные образцы фотометрического контроля.

6. Выключение установки ВУП-5М

- 6.1. Закрыть колпак над рабочим объемом.
- 6.2. Откачать рабочую камеру до давления $3 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст.
- 6.3. Нажать кнопку "Стоп" на пульте управления.
- 6.4. Дождаться остывания диффузионного насоса - загорится индикатор «Стоп».
- 6.5. Отключить форнасос - отжать кнопку "ФН".
- 6.6. Отжать кнопку "Сеть".
- 6.7. Отключить с помощью рубильника напряжение 380 В.
- 6.8. Закрыть воду, охлаждающую диффузионный насос.

Контрольные вопросы

1. Основные методы получения тонких пленок. Принципы, лежащие в основе этих методов. Преимущества и недостатки.
2. Классификация систем ионно-плазменного распыления материалов.
3. Принцип действия магнетронной системы распыления. Распыление на постоянном токе.
4. Область разрядного промежутка. Движение заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях.
5. ВАХ разряда. Условия существования стабильного разряда.
6. Порядок работы на установке ВУП-5М

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмичев А. Магнетронные распылительные системы. Книга 1. Введение в физику и технику магнетронного распыления. М.:Аверс, 2008. – 244 с.
2. Физика твердого тела: Лабораторный практикум/ Под ред. Проф. А.Ф.Хохлова. Том 1. – Н.Новгород: Изд-во ННГУ, 2000.- 360 с.
3. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок.- М.: Энергоатомиздат, 1989.- 328с.
4. Технология тонких пленок. Справочник. Т1/ Под ред.Л.Майсела, Р.Гленга. М.: Сов.радио, 1977.- 664 с.
5. Данилин Б.С., Сырчин В.Н. Магнетронные распылительные системы. М.: Радио и связь, 1982.- 72 с.
6. Курносоев А.И.. Юдин В.К. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. М.: Высшая школа, 1986. 366 с.
7. P.J. Kelly, R.D. Arnell, Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. Vacuum 56 (2000) 159-172.
8. J. Musila, P. Barocha, J. Vlčeka, K.H. Namc and J.G. Hanc, Reactive magnetron sputtering of thin films: present status and trends, Thin Solid Films, V. 475, Issues 1-2, 2005, P. 208-218
9. K. Sarakinosa, J. Alamib, and S. Konstantinidisc, High power pulsed magnetron sputtering: A review on scientific and engineering state of the art, Surface and Coatings Technology, V. 204, Issue 11, 2010, P. 1661-1684.
10. P. Kelly, C. F.Beevers, P. Henderson, R. D. Arnell, H. Backer, J. W. Bradley, A comparison of titanium-based films produced by pulsed and continuous DC magnetron sputtering, Surface and coatings technology, 2003, vol. 174/175, pp. 795-800.
11. I. Safi. Recent aspects concerning DC reactive magnetron sputtering of thin films: a review. Surface and Coatings Technology, V. 127, Issues 2-3, 2000, P. 203-218.

Лабораторная работа 2. Получение тонких магнитных пленок на диэлектрических подложках методом ВЧ-магнетронного осаждения

Метод высокочастотного магнетронного осаждения

Движение электрона в переменном ВЧ поле

В отличие от постоянного, для переменного тока присутствие диэлектрика в цепи не препятствие, переменный ток протекает через электроды и при отсутствии разряда. Это позволяет распылять как проводники, так и диэлектрические мишени.

В случае низких частот мы имеем последовательность кратковременных разрядов постоянного тока с чередующейся полярностью напряжения, так как длительности каждого полупериода достаточно для полного установления разряда. Таким образом, разряд на переменном токе низкой частоты *не отличается* от разряда на постоянном токе в том смысле, что для его поддержания также необходимы *вторичные электроны*, эмитируемые электродами, и что при уменьшении давления газа он погаснет при том же его значении $p_{\text{мин}}$, что и соответствующий ему разряд на постоянном токе.

Начиная с частот 50 кГц и выше, $p_{\text{мин}}$ постепенно снижается с ростом частоты. Очевидно, что разряд в этом случае пополняется электронами помимо вторичной электронной эмиссии из электродов. Генерация дополнительных электронов в высокочастотном разряде происходит потому, что электроны, колеблющиеся в ВЧ поле, могут приобрести энергию, достаточную для ионизации объема газа.

Высокочастотным называют диапазон примерно от 1 до 100 МГц. Этот диапазон используется в радиовещании и для радиосвязи. Согласно международному соглашению, чтобы исключить *радиопомехи*, для мощных лабораторных и промышленных установок выделили несколько узких

частотных интервалов. Для магнетронных распылительных систем чаще всего употребляется частота $f = 13,56$ МГц, которой соответствует длина волны $\lambda = 22$ м.

В любом разряде носителями электрического тока, как правило, служат свободные электроны. Тяжелые, малоподвижные ионы выступают в роли носителей тока только там, где плотность электронов в сотни раз меньше, чем плотность ионов. Обычно в высокочастотных разрядах газ *ионизирован очень слабо* (до степени $10^{-8} - 10^{-7}$), поэтому столкновения электронов с ионами или другими электронами не имеют большого значения. Сталкиваясь с молекулами, электрон резко меняет направление своего движения (*рассеивается*).

Уравнение движения электрона в осциллирующем электрическом поле $E = E_0 \sin(\omega t)$ в газе будет иметь вид:

$$m\dot{V} = -eE_0 \sin \omega t - mVv_m \quad (8)$$

здесь v_m – эффективная частота столкновений электрона.

Решение этого уравнения:

$$V = \frac{eE_0}{m\sqrt{\omega^2 + v_m^2}} \cos(\omega t + \varphi), \quad \varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{v_m}{\omega}\right) \quad (9)$$

$$r = \frac{eE_0}{m\omega\sqrt{\omega^2 + v_m^2}} \sin(\omega t + \varphi) \quad (10)$$

Рассмотрим два предельных случая.

1). При $v_m \ll \omega$ столкновениями можно пренебречь – режим свободных колебаний электрона.

2). При низких частотах и частых столкновениях $v_m \gg \omega$ электрон совершает дрейфовое движение. В этом случае:

$$V = -\frac{eE_0}{mv_m} \sin(\omega t), \quad r = \frac{eE_0}{m\omega v_m} \cos(\omega t) \quad (11)$$

При ускорении в электрическом поле, электрон приобретает допол-

нительную кинетическую энергию. При столкновении скорость его резко меняется произвольным образом, в среднем вектор скорости обращается в нуль, и электрон начинает как бы заново ускоряться в направлении действия поля. Приобретенная между столкновениями энергия направленного движения переходит в энергию хаотического движения.

В случае дрейфового движения за единицу времени поле совершает над электроном работу $\langle -eEV \rangle = e^2 E^2 / (mv_m)$, $E = E_0 / \sqrt{2}$ — среднеквадратичное поле. К тому же при каждом эффективном столкновении электрон передает молекуле некоторую долю δ своей средней энергии ε . Если столкновения упругие, как в одноатомном газе, в среднем $\delta = 2m/M$, где M — масса молекулы.

Приравнявая приобретенную электроном за единицу времени энергию и потери, получим уравнение

$$\frac{e^2 E^2}{mv_m} = \delta \bar{\varepsilon} v_m \quad (12)$$

которое определяет среднюю энергию электронов в поле ε . В силу того, что $\delta \ll 1$, энергия хаотического движения электрона гораздо больше энергии его колебаний.

Вместо ε часто пользуются понятием электронной температуры T_e , которую вводят свойственным максвелловскому распределению по скоростям равенством $\varepsilon = (3/2)kT_e$. Из уравнения (12), где $v_m \sim p$ видно, что ε или T_e являются функциями отношения E/p . В разряде электроны рождаются в результате ионизации молекул ударами достаточно энергичных для этого электронов, количество которых существенно зависит от T_e . При максвелловском распределении оно пропорционально $\exp(-I/(kT_e))$, где I — потенциал ионизации, причем $I \gg kT_e$.

Известно, что в переменном поле в вакууме свободный электрон колеблется со скоростью, сдвинутой по фазе на 90° относительно напряжен-

ности приложенного поля. При этом в среднем он *не поглощает* энергию приложенного поля. Однако если электрон, колеблющийся в переменном поле, испытывает *столкновения* с атомами газа, в результате чего его простое гармоническое движение становится *беспорядочным*, он *может поглощать* энергию поля. Компонента скорости электрона, соответствующая его хаотическому движению, может нарастать от столкновения к столкновению до тех пор, пока энергия электрона не станет достаточной для ионизирующего столкновения с атомом газа. Высокое напряжение на катоде, необходимое для получения вторичных электронов в случае разряда в постоянном токе, не обязательно для поддержания ВЧ разряда.

Постоянный потенциал ВЧ – плазмы

Механизм поглощения электронами энергии ВЧ поля для случая ионов, которые не могут приобрести в таком поле энергию большую, чем несколько электрон-вольт, неприменим. Кроме того, как уже указывалось, нет необходимости использовать высокие напряжения для поддержания ВЧ разряда, так как такой разряд не зависит от числа вторичных электронов, эмитируемых с электродов. Поэтому на первый взгляд может показаться, что в ВЧ разряде нет ионов, обладающих энергией, необходимой для ионного распыления мишени.

Дрейфовые скорости и амплитуды колебаний ионов на два порядка меньше, чем соответствующие значения для электронов. Следовательно, наличие на электроде (мишени) только ВЧ- напряжения не может привести к распылению, поскольку при этом возникает лишь колебательное движение ионов с очень малой амплитудой.

В большей части разрядного промежутка плазма электронейтральна. Однако около электродов электронный газ, совершая колебания относительно ионов, периодически лишает положительные заряды ионов элек-

тронного окружения. Это является первопричиной появления приэлектродных слоев пространственного заряда. На Рис.12 схематически изображена картина колебаний электронов, построенная в предположении: $n_+ = \text{const}$; $n_e = 0$ в приэлектродных слоях; $n_+ = n_e$ в плазме. Например, в момент $t=0$, плазма заполняет среднюю часть промежутка, и около электродов образуются одинаковые положительно заряженные слои толщины A . Через четверть периода, при $\omega t = \pi/2$, электроны сдвинулись до конца вправо, и у левого электрода обнажился ионный слой толщины $2A$.

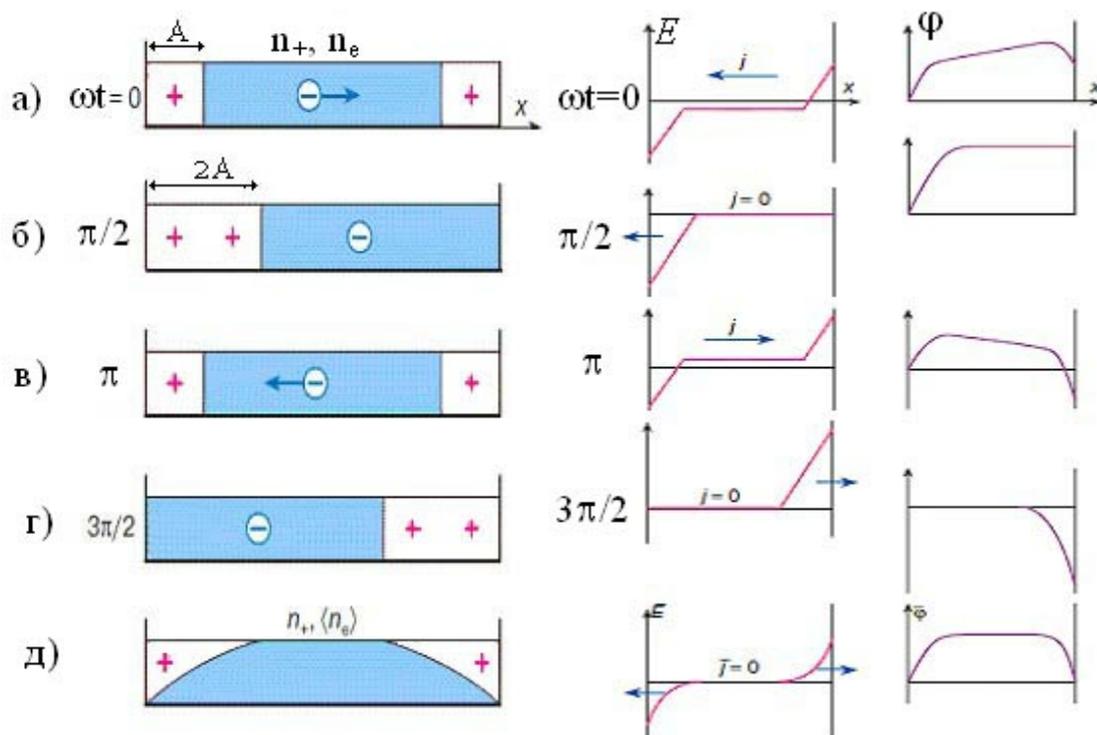


Рис.12. Схема колебаний электронного газа (n_+ , n_e – плотность ионов и электронов, соответственно), электрического поля E и потенциала ϕ в разрядном промежутке (а-г). Приведены также средние значения за период (д)

Поскольку в газовом промежутке появляется нескомпенсированный положительный заряд, электронейтральная плазма обладает неким постоянным положительным потенциалом V по отношению к электродам. Он равен среднему за период потенциалу плазмы (потенциалы электродов в среднем равны нулю). Это замечательное свойство ВЧ- разряда лежит в основе всех

его приложений для ионной обработки материалов. Ионы, вылетающие из плазмы вследствие всегда существующего теплового движения, ускоряются в постоянном среднем поле $E=V/A$, и бомбардируют мишень, помещенную на один из электродов. Чтобы ионы летели строго перпендикулярно к поверхности, что крайне желательно для современной технологии, давление делают низким, чтобы исключить по возможности рассеивающие столкновения ионов с молекулами. В этом случае и энергетический спектр ионов менее размыт, так как энергия большинства ионов соответствует разности потенциалов V .

Применение магнитного поля в установках ВЧ-распыления

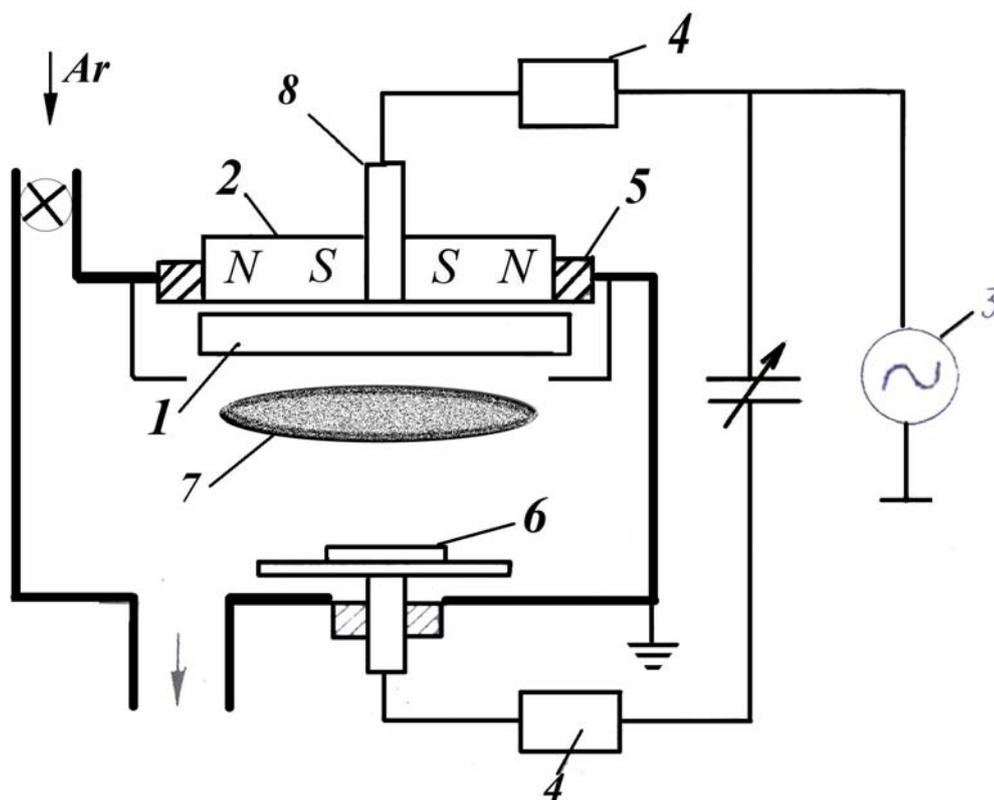


Рис.13. Схема установки для ВЧ-магнетронного распыления: 1 - распыляемая мишень, 2 - магнитная система, 3 - ВЧ-генератор, 4 - блок согласования, 5 - изолятор, 6 - подложка, 7 - плазма, 8 - ВЧ-электрод

В реальных системах распыления один из электродов заземлен, поэтому все заземленные элементы распылительной камеры являются одним

из электродов. Поскольку площадь заземленного электрода много больше, постоянный потенциал плазмы относительно малого электрода, который используется в качестве мишени, гораздо больше. Чем лучше сконцентрирована плазма в пространстве около мишени, тем меньше влияние заземленных стенок, и тем больше потенциал плазмы. В связи с этим для обеспечения более интенсивной бомбардировки мишени ионами, т.е. более эффективного распыления мишени, применяется магнитное поле.

В ВЧ магнитных распылительных системах обычно используется поперечное магнитное поле. При магнитной индукции 0,01—0,02 Тл все практически приложенное к разряду ВЧ- напряжение падает в области пространственного заряда вблизи ВЧ- электрода. Напряженность ВЧ- поля в плазме достаточно мала, так что можно пренебречь его влиянием на траекторию движения быстрых (способных производить ионизацию или диссоциацию) электронов плазмы, поэтому их траекторию можно представить в виде спирали, ориентированной вдоль силовых линий магнитного поля. Основным источником ионизации являются электроны, образованные в плазме и ускоренные ВЧ- полем на границе плазма/область пространственного заряда; энергия этих электронов составляет несколько десятков электрон-вольт. Вторичные электроны в этом случае играют второстепенную роль, доказательством чего является то, что ВЧ- разряд можно поддерживать при напряжении на разрядном промежутке всего несколько десятков вольт (при столь малом напряжении тлеющий разряд не может существовать только за счет вторичных электронов). Столь большая разница в энергиях ионизирующих электронов в разряде на постоянном токе и ВЧ- разряде позволяет эффективно удерживать электроны в ВЧ- разряде при более слабых магнитных полях, что существенно упрощает задачу формирования магнитных ловушек для ионизирующих электронов в ВЧ- разряде.

ВЧ- электродный разряд при давлении рабочего газа $P < 10$ Па имеет

две достаточно четко выраженные области: прилегающую к ВЧ- электроду область пространственного заряда (ОПЗ), визуально наблюдаемую как область слабого свечения (темное катодное пространство), и ярко светящуюся область плазмы в остальном межэлектродном пространстве. Эта область подобна области положительного столба в разряде на постоянном токе. Напряженность электрического поля в ней, как правило, мала (несколько В/см), и практически все приложенное к разряду ВЧ- напряжение падает в области пространственного заряда.

Эффективность ионизации в той или иной МРС для слабоионизованной плазмы характеризуется отношением концентрации ионов и атомов газа в единице объема, которое для ВЧ- разряда без магнитного поля составляет $10^{-7} - 10^{-5}$, ВЧ- разряда в поперечном однородном магнитном поле $10^{-5} - 10^{-4}$, СВЧ- разряда — до $2 \cdot 10^{-2}$.

ВЧ МРС обладают преимуществами перед обычными диодными распылительными системами без магнитного поля:

- более низким (примерно на порядок) рабочим давлением, что обеспечивает бесстолкновительное движение ионов в области пространственного заряда;
- отсутствием явления диффузии распыленных частиц;
- снижением энергии ионов до сотен электрон-вольт и возможностью ее регулирования в широких пределах с помощью магнитного поля при неизменной вводимой в разряд мощности, что дает возможность устанавливать оптимальную для данного процесса энергию бомбардирующих ионов;
- увеличением скорости распыления по сравнению с распылительными системами без магнитного поля при одинаковой мощности, вводимой в разряд, за счет более высокой степени ионизации в результате более полного использования энергии быстрых электронов

плазмы.

Согласование и стабилизация ВЧ- мощности

Характерной особенностью ВЧ- распыления является необходимость согласования ВЧ- генератора с распылительной системой, полное сопротивление (импеданс) которой может меняться в широких пределах в зависимости от давления рабочего газа и размеров электродов. Устройство согласования в этих условиях должно обеспечивать определенное сопротивление, вносимое в выходной контур со стороны нагрузки. Только в этом случае ВЧ- генератор будет иметь хороший КПД и отдавать в нагрузку номинальную мощность.

Отсутствие регулируемых устройств согласования приводит к снижению КПД генератора и мощности, передаваемой им в распылительную систему, и, как следствие, к изменению параметров, характеризующих процесс распыления, что делает его нестабильным и невоспроизводимым.

Для стабилизации процесса распыления ВЧ- генератор следует подсоединять к нагрузке с помощью согласующего кабеля, включая между кабелем и РС устройство согласования. Эта схема согласования наиболее удобна, поскольку она обладает следующими достоинствами:

- в генераторе не требуются элементы настройки, поскольку он работает на фиксированную нагрузку, равную волновому сопротивлению кабеля;
- ВЧ- генератор может работать практически с любой МРС и при этом изменяются лишь элементы устройства согласования, находящиеся вне генератора;
- кабель работает в режиме, близком к режиму бегущей волны, т. е. при максимальном напряжении на нем.

Для обеспечения работы генератора на согласованный кабель необхо-

димо, чтобы со стороны РС кабель был нагружен на чисто активное сопротивление, равное характеристическому сопротивлению этого кабеля $R_{ХАР}$. С этой целью между кабелем и РС включают согласующий четырехполюсник, который «пересчитывает» полное сопротивление РС $Z_{РС}=R_{РС}+jX_{РС}$ в сопротивление $R_{ХАР}$ (где $R_{РС}$ и $X_{РС}$ - соответственно активная и реактивная составляющие РС).

Наиболее простым и удобным четырехполюсником является Г-образная цепочка, состоящая из двух реактивных элементов $X_{ПОСЛ}$ и $X_{ПАР}$, значения которых могут быть найдены из условия равенства полного сопротивления согласующего четырехполюсника, нагруженного на систему распыления, значению $R_{ХАР}$.

Для осуществления процесса согласования необходим индикатор, роль которого может выполнять измеритель мощности, применяемый в коротковолновых передатчиках связи. Регулирование элементов согласования четырехполюсника в этом случае производится до тех пор, пока отраженная мощность не станет равной нулю.

При увеличении магнитной индукции поля до 0,01 Тл импеданс разрядного промежутка уменьшается в несколько раз вследствие увеличения плотности плазмы. Уменьшение импеданса происходит в основном за счет снижения его реактивной составляющей, в то время как активная составляющая изменяется незначительно. Для согласования импеданса разрядного промежутка с выходным сопротивлением ВЧ- генератора целесообразно использовать Г- образный четырехполюсник с емкостью, параллельной его входу, и индуктивностью, включенной последовательно с нагрузкой. Подобного рода схема обеспечивает согласование во всем диапазоне изменения индукции магнитного поля. Поскольку при изменении индукции магнитного поля активная составляющая импеданса изменяется незначительно, согласование ВЧ- генератора с нагрузкой достигается только пу-

тем регулирования индуктивности. Это позволяет использовать сравнительно простое устройство автоматического согласования с фазовым дискриминатором в качестве датчика рассогласования.

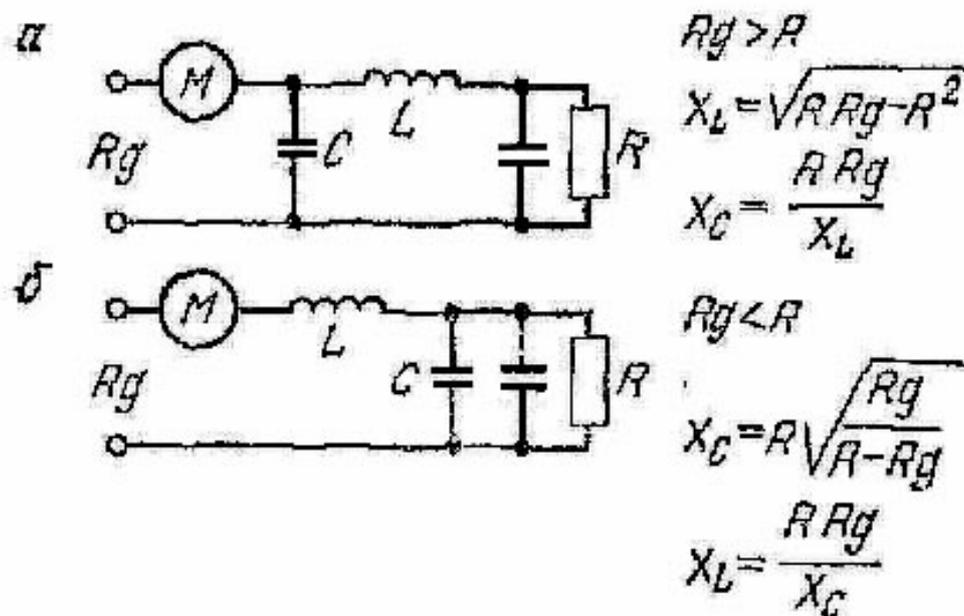


Рис.14. Типичная схема согласования импеданса ВЧ – генератора и его нагрузки

На Рис.14 приведены две, чаще всего используемые схемы согласования и формулы для расчета параметров их компонентов. Здесь R_G - импеданс генератора (который почти всегда равен 50 Ом и приводится в описании прибора), а R - импеданс ВЧ тлеющего разряда. Величина импеданса разряда должна быть измерена для каждой конкретной системы. В большинстве случаев импеданс генератора выше импеданса разряда, так что в этом случае следует использовать схему с Г-образным четырехполюсником, показанную на Рис.14а. Конденсатор, изображенный пунктиром, представляет собой емкость между ВЧ электродом и его экраном. В принципе, его можно было бы рассматривать как часть согласующей схемы. Однако на практике этот конденсатор имеет довольно низкую добротность, и, если экран расположен очень близко к ВЧ электроду (что является обычным

для систем распыления на постоянном токе), могут иметь место большие потери мощности. Часто в схему согласования включают разделительный конденсатор. Хотя ту же роль играет изолированный электрод мишени, использование внешнего конденсатора позволяет исключить всякую неопределенность, связанную с утечками сквозь диэлектрик мишени и по ее краям.

Распыление многокомпонентных материалов

Важным преимуществом метода ионного распыления является то, что пленки многокомпонентных материалов, полученные этим методом, во многих случаях имеют тот же химический состав, что и материал распыляемого катода. Сказанное справедливо и в тех случаях, когда скорости распыления отдельных компонентов существенно различны. В самом начале распыления многокомпонентного катода с его поверхности быстрее всего уходит компонент с наибольшей скоростью распыления. Вскоре на поверхности катода образуется так называемая «измененная область». По сравнению с исходным материалом эта область оказывается сильно обедненной компонентом с максимальным коэффициентом распыления. При дальнейшем распылении катода осаждается пленка такого же состава, что и исходный материал.

Если же состав пленки, нанесенной ионным распылением, отличается от состава распылявшегося катода, это может быть следствием одной из следующих трех причин:

1. Слишком высокая температура катода. Это может вызвать не только диффузию в «измененный» слой, но и привести к испарению из катода одного или нескольких компонентов системы, имеющих в этих условиях достаточно высокое давление паров.
2. Преобладают эффекты окисления. В большинстве реальных систем на

поверхности катода присутствует некоторое количество окисла, особенно в начале распыления. Точное количество окисла определяется соотношением между парциальным давлением окислителей в системе и скоростью распыления материала. Если окислы покрывают значительную часть всей площади катода, относительные скорости распыления компонентов будут определяться не чистыми материалами, а их окислами.

3. Происходит повторное распыление осаждаемой пленки, как например, при ионном распылении со смещением. В этом случае с поверхности пленки будет в основном распыляться материал с максимальным коэффициентом распыления. В отличие от распыляемой поверхности катода поверхность растущей пленки постоянно пополняется материалом катода с исходным соотношением компонентов, так что «измененный» слой здесь образовываться не сможет. Перенос материала с высоким коэффициентом распыления на катод и обратно сам по себе был бы несущественен для процесса нанесения пленки, если бы не неизбежная потеря некоторой его части за счет диффузии из межэлектродного пространства. Заметим, что при расчете относительных скоростей распыления различных атомов с поверхности пленки должны учитываться их относительные атомные радиусы, так как для атома с большим радиусом вероятность попасть под «удар» бомбардирующего иона будет больше.

Методом ионного распыления можно также «синтезировать» многокомпонентные пленки. В этом случае для каждого компонента можно использовать отдельный катод, либо использовать составную мишень (см. Рис. 15). Метод основан на том факте, что не весь распыляемый материал осаждается прямо под той областью катода, из которой он был распылен, часть его переносится в стороны и осаждается на некотором удалении. В результате происходит хорошее перемешивание компонентов, распыляемых с отдельных перемежающихся катодов.

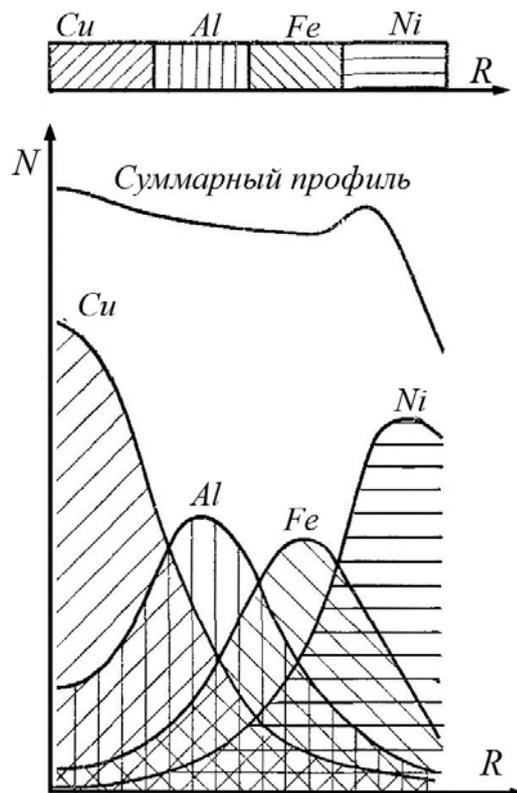


Рис.15. Распределение распыленного материала концентрических областей составного катода в плоскости подложки

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

ВЧ магнетронная распылительная система ВУП-5МВ

Модернизированный вакуумный универсальный пост ВУП-5МВ предназначен для осаждения пленок металлов, полупроводников и диэлектриков методом ВЧ магнетронного распыления.

Прибор состоит из двух частей - вакуумной и электрической. В вакуумной стойке размещены: вакуумная система, система напуска газов, распределительный щиток и электропитание для подогрева подложек. В верхней части стойки смонтирован пульт управления.

Электрическая стойка состоит из источника ВЧ-напряжения, блоков питания и управления. В рабочем объеме устройства смонтирована магнетронная распылительная система, схематическое изображение которой

приведено на Рис.16.

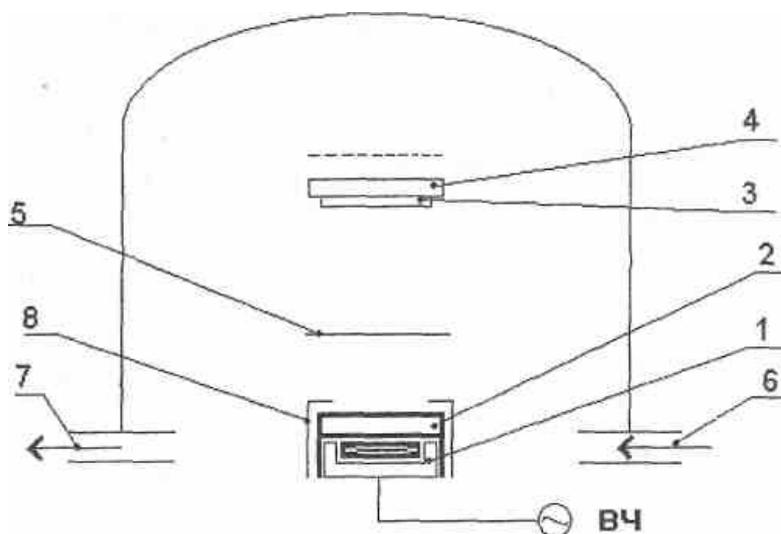


Рис.16. Схема установки осаждения: 1 - магнетронное устройство; 2 - мишень; 3 - подложка; 4 – подложкодержатель - печь; 5 - заслонка; 6 - система напуска; 7 - система откачки; 8 - анод-экран

Перед осаждением на катод магнетрона (1) с помощью электропроводящего клея устанавливается мишень (2) из распыляемого материала. Подложки (3), на которые осаждаются пленки, крепятся на подложкодержателе печи (4). Температура подложки контролируется хромель-алюмелевой термопарой. Исходный вакуум для предварительной очистки рабочей камеры доводят до $2 \cdot 10^{-4}$ Па диффузионным насосом. С помощью электронной системы напуска через ввод (6) производят напуск рабочего газа (обычно Ar) или смеси газов. ВЧ- напряжение подается на катод МРС с генератора ГВЧ-0,5-13,56-86 через ВЧ- вакуумный ввод.

Основные параметры и характеристики ВЧ магнетронной распылительной системы ВУП-5МВ:

- остаточное давление в камере, создаваемое диффузионным насосом при охлаждении ловушки азотом, $1,310^{-4}$ Па;
- время откачки 30 мин;

- максимальное напряжение ВЧ- генератора 3 кВ;
- частота ВЧ- напряжения 13,56 МГц;
- максимальная мощность ВЧ- генератора 600 Вт;
- температура подложек до 1000°С;
- время нагрева подложек 30 мин.

Управление магнетронной системой ВУП-5МВ осуществляется с пульта управления. С пульта обеспечивается выход в рабочий режим вакуумной системы и ее коммутация, а также подогрев подложек, управление системой напуска и ВЧ- генератором в процессе осаждения. Схема вакуумной коммутации ВУП-5МВ приведена на Рис.17.

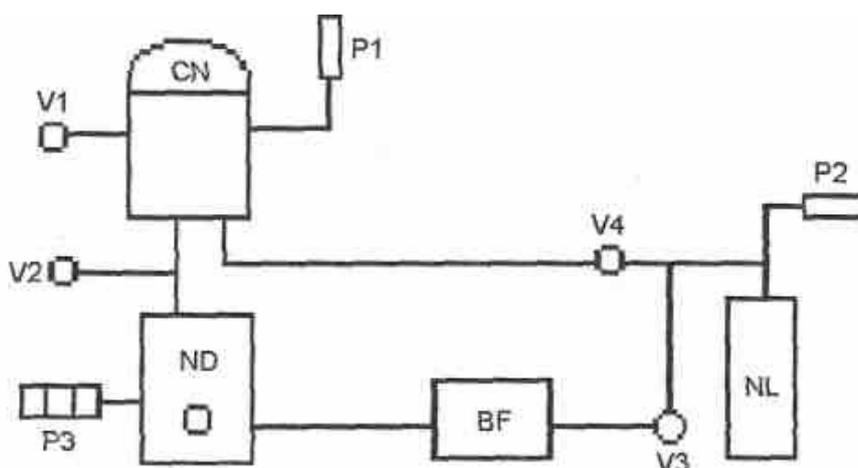


Рис.17. Схема вакуумной коммутации ВУП-5М-ВЧ: CN - рабочий объем; V1, V2 - вакуумные клапаны ручного привода; NL - насос форвакуумный; ND- насос диффузионный; V3, V4 - вакуумные клапаны электронного управления; BF - баллон форвакуумный; P1, P2 – датчики давления термопарные ПМТ-1; P3-датчик давления ионизационный ПМИ

Приготовление мишеней

Исходными продуктами для создания мишеней сложного состава являются составляющие компоненты в виде порошков.

Перед формированием мишени рассчитываются необходимое молярное

соотношение компонент. Рассчитываются *веса* компонент, необходимые для получения многокомпонентной мишени толщиной ~2 мм, с учетом конечной пористости мишени около 15%. Для круглой мишени диаметром 40 мм этот объем составит ~2 см³.

Далее компоненты взвешиваются в необходимом весовом соотношении, тщательно перетираются в ступке и перемешиваются механической мешалкой в течение 1 часа.

Формовка мишеней в виде дисков диаметром 40 мм и толщиной ~2 мм производится в разборной пресс-форме путем холодного прессования.

Сформированная мишень-таблетка отжигается в вакууме при $T \sim 1000^\circ\text{C}$ в течение 5 часов, затем мишень снова перетирается, формуется и подвергается окончательному отжигу при той же температуре.

Порядок работы на установке ВУП-5МВ

1. Подготовка установки к осаждению пленок

- 1.1. Включением рубильника на щите подать напряжение 380 В на установку.
- 1.2. Открыть кран подачи воды для охлаждения диффузионного насоса и магнетронной системы. Проверить работу охлаждающей системы.
- 1.3. Нажать кнопку "Сеть" на блоке управления (*должна загореться лампочка на индикаторе*).
- 1.4. Установить мишень на магнетрон и подложку на подложкодержатель. Закрыть колпак над рабочим объемом.
- 1.5. Включить форвакуумный насос, нажав кнопку "ФН" на пульте управления.
- 1.6. После достижения вакуума $1,5 \cdot 10^{-1}$ мм.рт.ст. на форвакуумном насосе (на индикаторе вакуума нажата кнопка "Д2") нажать кнопку

"BF" для предварительной откачки буферного баллона.

- 1.7. После достижения вакуума $1,5 \cdot 10^{-1}$ мм.рт.ст. в буферном баллоне (на индикаторе вакуума нажата кнопка "Д4") включить диффузионный насос нажатием кнопки "НД" на пульте управления.
- 1.8. После разогрева диффузионного насоса (~45 мин) залить азот в азотную ловушку.
- 1.9. С помощью индикатора вакуума замерить показания ионизационного датчика. Перед напуском рабочей смеси газов давление в РО должно быть $\sim 3 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст.
- 1.9. Регулятором напряжения установить, по значению ЭДС термопары, необходимую температуру подложек.
- 1.10. Включить электронную систему напуска газа. Открыть баллон с рабочей смесью и регулятором установить необходимое давление в рабочей камере.
- 1.11. Включить генератор, поставить тумблер "Накал" в положение "Вкл.". По истечении 15 мин нажать кнопку "Анод пуск". Кнопкой "Поджиг" зажечь плазму. Регулятором "Связь" установить максимальное напряжение, регулятором "Подстройка вторичного контура" установить необходимый ток.
- 1.12. По истечении 5 мин открыть заслонку.
- 1.13. По завершении процесса осаждения закрыть заслонку.
- 1.14. На ВЧ-генераторе нажать кнопку "Анод-стоп", тумблер "Накал" поставить в положение "Выкл." (по истечении 25 мин выключить генератор).
- 1.15. Отключить электронную систему напуска. Закрыть редуктор баллона с газовой смесью.
- 1.16. Выключить нагреватель подложек в обратной включению последовательности.

1.17. После остывания подложек до температуры $T < 40^{\circ}\text{C}$ можно развакуумировать камеру.

2. Извлечение образцов из рабочей камеры

- 2.1. Нажать кнопку «НВ» - напуск воздуха. По завершению напуска воздуха загорится лампочка «НВ».
- 2.2. Открыть колпак, снять подложки с подложкодержателя.

3. Отключение установки

- 3.1. Закрыть колпак над рабочим объемом.
- 3.2. Откачать рабочую камеру до давления $3 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст.
- 3.3. Нажать кнопку "Стоп" на пульте управления.
- 3.4. Дождаться остывания диффузионного насоса - загорится индикатор «Стоп».
- 3.5. Отключить форвакуумный насос - отжать кнопку "ФН".
- 3.6. Отжать кнопку "Сеть".
- 3.7. Отключить с помощью рубильника напряжение 380 В.
- 3.8. Закрыть воду, охлаждающую диффузионный насос.

Контрольные вопросы

1. Принцип действия ВЧ магнетронного распыления.
2. Наблюдаемое на магнетроне свечение – отрицательное свечение или положительный столб?
3. Рассчитайте амплитуду движения иона в переменном ВЧ поле.
4. Как меняется V зажигания разряда в зависимости от степени напуска рабочего газа в рабочий объем установки?
5. Преимущества и недостатки по сравнению с магнетронной распылительной системой на постоянном токе и ВЧ- распылением без магнитного поля.

6. Условия существования стабильного разряда.
7. Коэффициент распыления, его зависимость от технологических параметров. Расчет коэффициента распыления.

Задание

1. Изучить устройство и принцип действия ВЧ магнетронной распылительной системы ВУП-5МВ.
2. Сформировать мишени заданного состава.
3. Освоить порядок технологических операций по нанесению пленок методом ВЧ магнетронного осаждения на установке ВУП-5МВ.
4. Получить и проанализировать экспериментальную ВАХ ВЧ-разряда МРС.
5. Получить несколько образцов пленок.
6. Определить толщину пленок, равномерность толщины пленок по поверхности, скорость осаждения в зависимости от режимов формирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Райзер Ю.П. «Физика газового разряда» Учеб. руководство для вузов, 2-ое изд., перераб. и доп., М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит. 1992, 536 с.
2. Andrzej Brudnik, Adam Czapla and Witold Posadowski, Studies of medium frequency high power density magnetron sputtering discharges, Vacuum, V. 82, Issue 10, 2008, P. 1124-1127
3. Pouloupoulos P, Karaklis V, Politis C, Schweiss P, Fuchs D., Non-magnetic hexagonal nanocrystalline ni films grown by radio frequency magnetron sputtering, J. Nanosci Nanotechnol. 2006, Issue 12, p.3867-70.
4. Kaixin Chen, Kin Seng Chiang, Hau Ping Chan and Pak Lim Chu, Growth of c-axis orientation ZnO films on polymer substrates by radio-frequency magnetron sputtering, Optical Materials, V. 30, Issue 8, 2008, P. 1244-1250
5. Данилин Б. С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. М.: Энергоатомиздат, 1989. 327 с.
6. Данилин Б. С, Логунов В. И. Высокочастотное ионное распыление // За-рубежная электронная техника. 1971. Вып. 3. С. 3-24.
7. Зарянкин Н. М, Логунов В. И. Исследование некоторых особенностей ВЧ-магнетронных систем // Электронная техника, 1980. Вып. 4 (88). С. 33-38.
8. Пост вакуумный универсальный ВУП-5М. Техническое описание и инст-рукция по эксплуатации.

I - ионы практически любых химических элементов, а также молекул или их фрагментов;

n - заряд иона, обычно положительный. Возможно использование многозарядных ионов. Интенсивность ионов в пучке для газоразрядного плазменного источника с увеличением заряда на единицу обычно уменьшается в 3-4 раза (т.е., например, если в полном спектре ионов ток однозарядного O^+ составляет 10 мкА, то ток ионов O^{++} - ~ 3 мкА). Практически не используются ионы с зарядом более +6, в первую очередь из-за их малого количества в плазме дугового разряда;

m₁ - масса иона, определяющая пробег иона в твердом теле;

z₁ - порядковый номер имплантируемого элемента, определяющий потери энергии при торможении;

S - атомы мишени. Мишень - любые тела в конденсированном состоянии, как элементарного состава, так и самого сложного включая полимеры, металлы, керамики, жидкие кристаллы;

m₂ - масса атома(ов) мишени;

z₂ - порядковый номер атома (ов) мишени в таблице Менделеева.

От величины m_2 и z_2 также зависит пробег ионов;

E - энергия ионов в пучке. В радиационной физике для удобства энергия измеряется в кэВ, МэВ, т.к. однозарядный ион, ускорившись в электростатическом поле между точками с разностью потенциалов U (вольт), приобретает энергию $E = eU$ (электронвольт). При этом такой энергией будут обладать все однозарядные ионы в пучке, двухзарядные - $2eU$ и т.д. Обычные энергии в ионной имплантации 100 кэВ (для сравнения: энергия связи атома в кристалле ~ 10 эВ).

Φ - доза облучения, иногда называемая флюенсом. Φ - количество ионов, попадающих на единицу площади мишени. Доза измеряется в количестве ионов на 1 см^2 (т.е. $[\text{ион}/\text{см}^2]$). Иногда Φ измеряют в $[\text{мкКл}/\text{см}^2]$ –

в соответствии с количеством заряда бомбардирующих ионов, приходящихся на единицу площади облучаемой поверхности. Соотношение единиц измерения для однозарядных ионов:

$$1 \text{ [мкКл/см}^2\text{]} = 6,2 \times 10^{12} \text{ [ион/см}^2\text{]}.$$

j - плотность потока ионов (скорость набора дозы) или плотность ионного тока; характеризует число ионов, попадающих на единицу площади поверхности мишени в единицу времени; измеряется в [ион/см²с]. Плотность ионного тока [мкА/см²с] связана с плотностью потока ионов:

$$1 \text{ [мкА/см}^2\text{]} = 6,2 \times 10^{12} \text{ [ион/см}^2\text{с]}.$$

Плотность потока ионов определяет, в основном, плотность радиационных нарушений, их взаимодействие между собой и накопление, а также температуру поверхности мишени.

T_м - температура мишени во время облучения. T_м обусловлена внешним нагревом различными способами и радиационным нагревом (за счет термализации кинетической энергии имплантированных ионов), а также теплоемкостью, теплопроводностью и тепловым излучением с поверхности (т.е. оттоком термализованной энергии).

Основные области применения метода ионной имплантации

1. Ионное легирование полупроводников активными атомами для получения полупроводников с различным типом проводимости, формирования активных и пассивных элементов в приборах микроэлектроники, а также проводящих дорожек и контактных площадок в производстве БИС и СБИС.
2. Ионный синтез тонких пленок разного состава для различных областей науки и техники. Например, ионный синтез тонких магнитных

пленок, ИС силицидов, ИС ВТСП-материалов, получение алмазов и т.п.

3. Имплантационная металлургия - облучение конструкционных материалов и готовых деталей потоками ионов, приводящее к увеличению их износостойкости, динамической прочности, коррозионной стойкости, твердости, улучшению трибологических свойств.

Преимущества метода ионной имплантации

1. Возможность точного контроля количества введенных атомов примеси простым интегрированием ионного тока.
2. Малое время процесса введения примесей.
3. Чистота технологии из-за применения масс-сепарации примесей в ускорителе (что очень важно в микроэлектронике).
4. Возможность создания строго локализованных легированных областей в кристалле, в том числе с субмикронными размерами и трехмерной локализацией.
5. Низкая температура мишени, что позволяет создавать резкие границы и тонкие слои.
6. Возможность легирования через тонкие пассивирующие слои (например, нитриды, оксиды и т.п.).
7. Возможность создания пересыщенных, по сравнению с равновесными, твердых растворов.
8. Многоступенчатая имплантация, позволяющая посредством изменения ускоряющего напряжения выбрать профиль распределения имплантированных примесей.
9. Возможность получения заглубленных слоев.

Основные недостатки метода ИИ

1. Бомбардировка тяжелыми частицами приводит к образованию радиационных дефектов, появление которых часто нежелательно, и обычно это требует последующей дополнительной энергетической обработки поверхности для их устранения.
2. Легирование путем имплантации ионов ограничено приповерхностным слоем. Для некоторых применений этот факт является ограничением возможностей метода.
3. Дополнительные эффекты при ИИ (каналирование, распыление, диффузия) делают практически невозможным получение теоретического профиля.
4. Метод ИИ недешев.

Торможение и пробеги ионов

Прохождение ионов через твердые тела сопровождается столкновением с частицами, приводящим к:

- торможению;
- изменению направления движения ионов;
- смещению атомов кристалла из узлов решетки;
- распылению материала мишени;
- излучению вторичных частиц и квантов.

Основные механизмы торможения ионов (при $E = 1 \text{ кэВ} - 10 \text{ МэВ}$):

1. Ядерные или упругие столкновения. При этом часть кинетической энергии передается атомам мишени, что вызывает образование смещенных из равновесного положения атомов. Этот механизм доминирует при низких скоростях ионов.
2. Возбуждение электронов и ионизация атомов тормозящей среды - главная причина потерь энергии для быстрых ионов (называют электронными или неупругими потерями).

Торможение ионов характеризуется величинами сечения электронного
го

$$S_e = -\frac{1}{N_0} \left(\frac{dE}{dx} \right)_e \quad (13)$$

и ядерного торможения

$$S_n = -\frac{1}{N_0} \left(\frac{dE}{dx} \right)_n \quad (14)$$

где N_0 - число атомов в единице объема,

$(dE/dx)_e$ и $(dE/dx)_n$ - соответствующие удельные потери энергии на единицу пути.

Расчет сечения для ядерного торможения по теории ЛШШ (Линдхард - Шарф - Шиотт) с использованием потенциала Томаса - Ферми и сечения электронного торможения (Линдхард и Винтер) дает следующие зависимости.

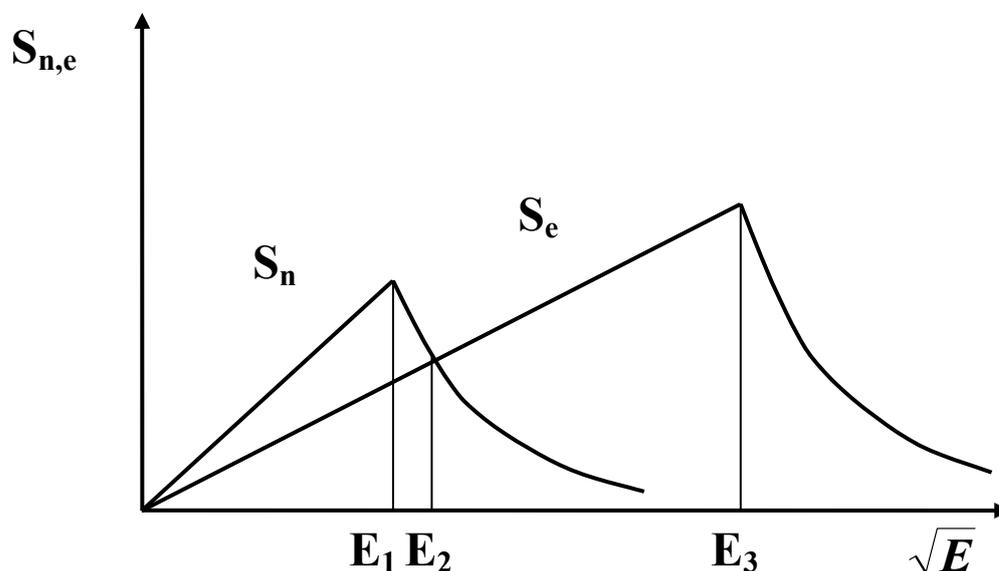


Рис.19. Зависимость тормозных сечений от энергии ионов

Некоторые численные значения энергий E_1 , E_2 , E_3 в Si и Ge приведены в Таблице 2.

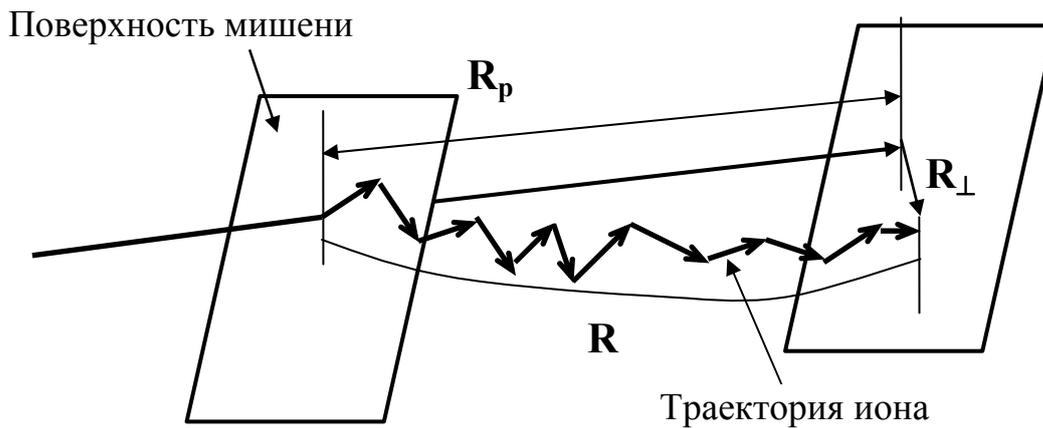
Таблица 2. Численные значения энергий E_1 , E_2 , E_3 (кэВ) в Si и Ge

Ион	E ₁		E ₂		E ₃
	Si	Ge	Si	Ge	Si
¹¹ B	3	7	17	13	3×10 ³
³¹ P	17	29	140	140	3×10 ⁴
⁷⁵ As	73	103	800	800	2×10 ⁵

Распределение пробегов

Зная величины $S_n(E)$ и $S_e(E)$, полный пробег R вычисляется следующим образом

$$R = \frac{1}{N_o} \int_0^{E_1} \frac{dE}{S_n(E) + S_e(E)} \quad (15)$$



- R** – полный пробег
- R_p** – проекционный пробег
- R_⊥** – боковое рассеяние

Рис.20. Траектория и пробег ионов в твердом теле

Профиль распределения пробегов

Для количественного описания используется обычно два основных подхода:

- - математическое моделирование процессов прохождения (метод Монте - Карло). На ЭВМ моделируются траектории нескольких сотен или тысяч ионов. В программах обычно учитываются потери энергии на неупругие и упругие столкновения, распыление, изменение элементного состава. Существуют стандартные программы: TRIM, DINA и др.;
- - метод моментов распределений. В теории ЛШШ в качестве первого приближения взято гауссово распределение. Оно хорошо описывается средним проективным пробегом \bar{R}_p и дисперсией или средним квадратичным отклонением $\Delta\bar{R}_p$ (страгглинг)

$$N(x) = \frac{\Phi}{\sqrt{2\pi\Delta\bar{R}_p}} \exp\left[-\frac{(x - \bar{R}_p)^2}{2\Delta\bar{R}_p^2}\right] \quad (16)$$

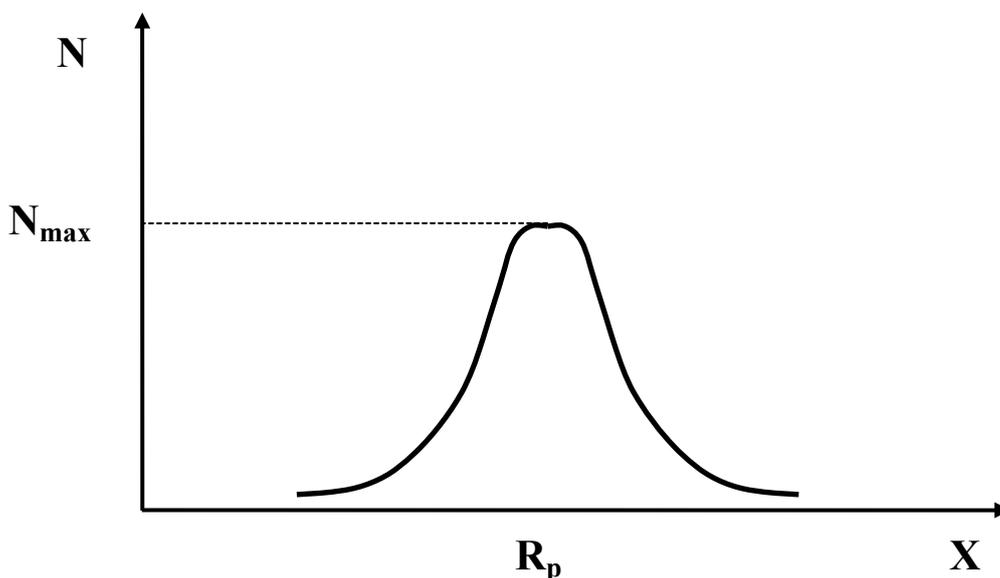


Рис.21. Профиль распределения пробегов имплантированных ионов

При таком распределении не учитываются диффузионное перераспределение, распыление и т.п. Однако, для оценок такое распределение очень удобно. Существуют таблицы \bar{R}_p и $\Delta\bar{R}_p$ для различных комбина-

ций ион - мишень при различных энергиях [Буренков А.Ф. и др. Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей.- Мн.: Изд-во БГУ, 1980.- 352с.].

В монокристаллах известен эффект каналирования - увеличение пробега при имплантации в направлениях кристаллографических осей, вдоль которых образуются каналы для движения имплантированных ионов.

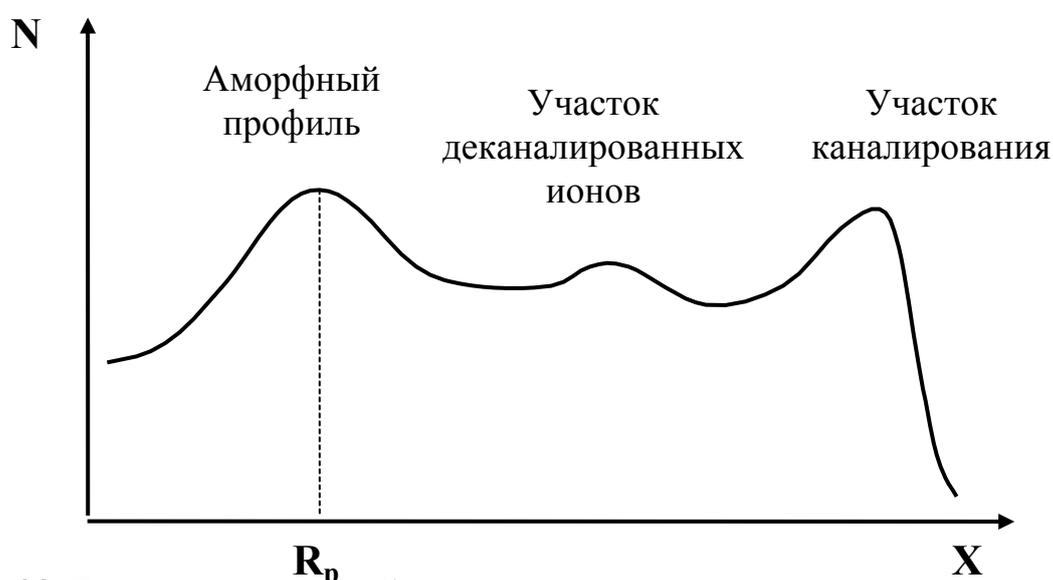


Рис. 22. Распределение пробега при каналировании

Рис.22. Распределение пробега при каналировании

Радиационное дефектообразование

Дефект - любое отклонение от периодической структуры в кристалле. При ИИ образуются различные дефекты возбуждения (фононы, электроны и дырки, экситоны, плазмоны и т.п.), а также геометрические дефекты (точечные, линейные, плоскостные, объемные).

Выбитые в процессе имплантации атомы могут сместить другие атомы, т.е. вызвать каскад смещений (см. Рис.23). Это приводит к накоплению вблизи траектории иона вакансий, междоузлий и сложных дефектов.

Наименьшее значение энергии E_d , которое необходимо передать одному из атомов кристалла для того, чтобы он оказался в междоузлии, называется пороговой энергией. Обычно E_d в 2-3 раза больше адиабатического смещения в междоузлие и составляет ≈ 25 эВ для кристаллов, у которых энергия связи ~ 10 эВ.

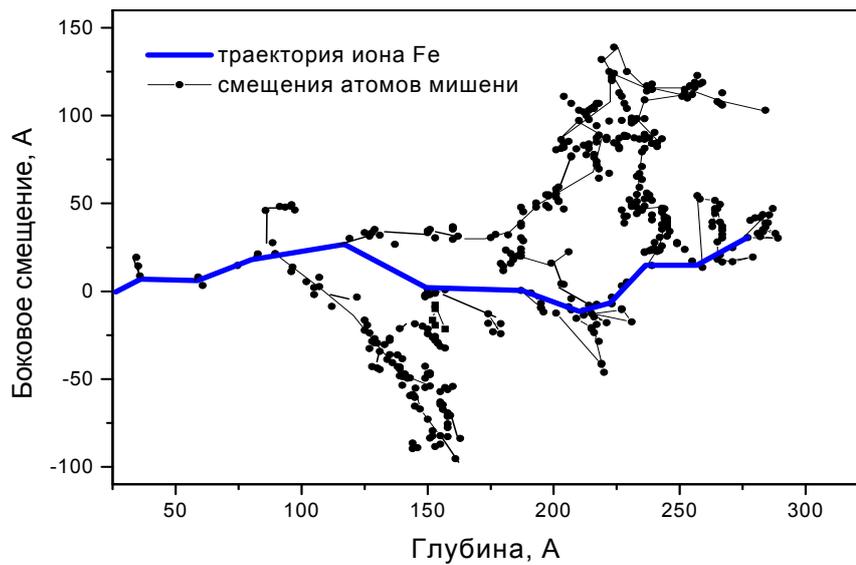


Рис.23. Схема образования каскада смещений. Расчет по программе TRIM для системы $\text{Si} \leftarrow \text{Fe}^+$ ($E=40$ кэВ)

В теории Кинчина-Пиза среднее число смещенных атомов, выбитых одним первичным ионом с энергией E_1 составляет

$$N = \frac{E_1}{2E_d} \quad (17)$$

Обычно распределение дефектов и внедренных ионов имеет вид, показанный на Рис.24.

Средняя глубина радиационных повреждений X_d и стандартное отклонение для них ΔX_d связано обычно следующими выражениями с соответствующими значениями R_p и ΔR_p

$$X_d \cong 0,8 R_p;$$

$$\Delta X_d \cong 0,75\Delta R_p$$

Если плотность радиационных дефектов велика, то кластеры радиационных дефектов перекрываются, и образуется аморфный слой.

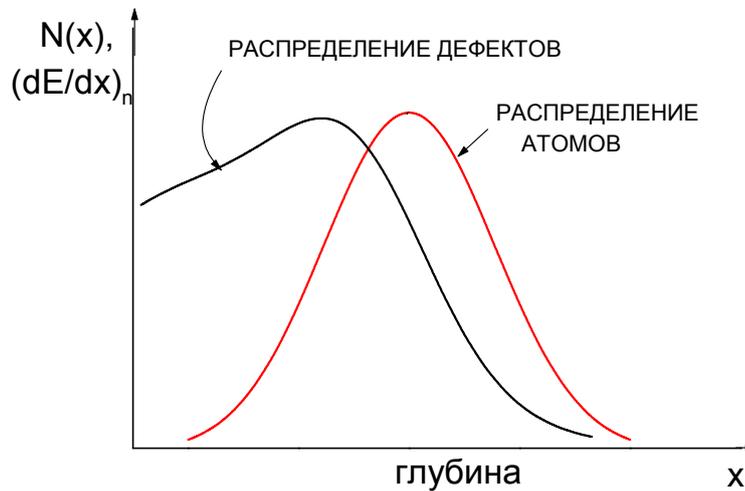


Рис.24. Профили потерь энергии в ядерных столкновениях $(dE/dx)_n$ (распределение дефектов) и распределения имплантированных ионов $N(x)$

Существуют 3 основных механизма аморфизации:

- формирование аморфных областей непосредственно в отдельной разупорядоченной области;
- взаимодействие (перекрывание) различных разупорядоченных областей, приводящее к их укрупнению, перестройкам и формированию аморфных областей;
- сток и накопление дефектов одного знака вблизи напряженных областей в кристалле.

Радиационное распухание (свеллинг)

Свеллинг - увеличение объема приповерхностного слоя за счет радиационного порообразования. Значительная часть пар «междоузлие - ва-

кансия» не успевают взаимно рекомбинировать в области их генерации и диффундируют к различного рода стокам, роль которых могут играть все протяженные дефекты структуры. При этом значительно более подвижные междоузельные атомы диффундируют быстрее, чем вакансии, обеспечивая тем самым пространственное разделение пар Френкеля. Избыточные вакансии, взаимодействуя друг с другом, объединяются в устойчивые комплексы (дивакансии, тетравакансии и т.д.) вплоть до микропор, что и приводит к распуханию бомбардируемого слоя.

Ионное распыление

Распыление - это процесс испускания нейтральных атомов, положительных или отрицательных ионов, многоатомных образований поверхностью твердого тела под действием быстрых заряженных частиц (ионов).

При физическом распылении атомы выбиваются из поверхности в результате передачи импульса от бомбардирующей частицы атомам мишени. Главным параметром, характеризующим процесс распыления, является коэффициент распыления S - число атомов, выбитых одним падающим ионом.

Согласно теории Зигмунда, зависимость для коэффициента распыления для аморфной или поликристаллической мишени при нормальном падении ионов вычисляется согласно уравнению Больцмана в теории переноса

$$S = 4,2 * 10^{14} * \alpha * \frac{S_n(E_1)}{E_b} \quad (18)$$

где $S_n(E_1)$ - сечение ядерного торможения [$\text{эВ} \cdot \text{см}^2/\text{атом}$];

E_b - поверхностная энергия связи [эВ], для Si: $E_b = 7,8 \text{ эВ}$;

α - множитель, зависящий от соотношения масс M_2/M_1 и принимающий значения $\alpha = 0,2 \dots 1,6$.

Зависимость $S = S(E_1)$ для Al, имплантированного различными ионами, показана на Рис.25.

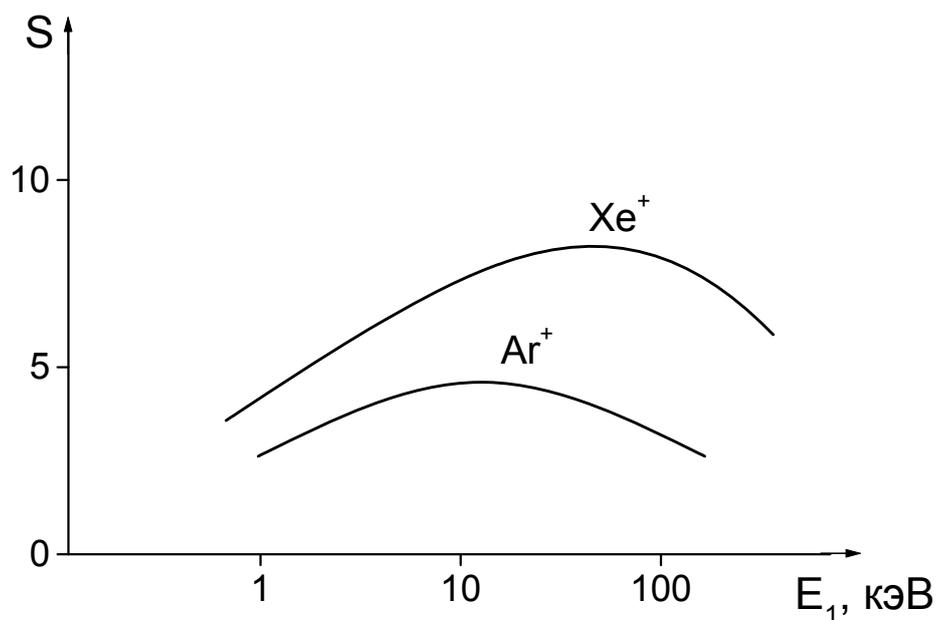


Рис.25. Зависимость коэффициента распыления алюминия от энергии различных бомбардирующих ионов

При изменении угла между нормалью к поверхности и направлением пучка коэффициент распыления изменяется, как показано на Рис.26.

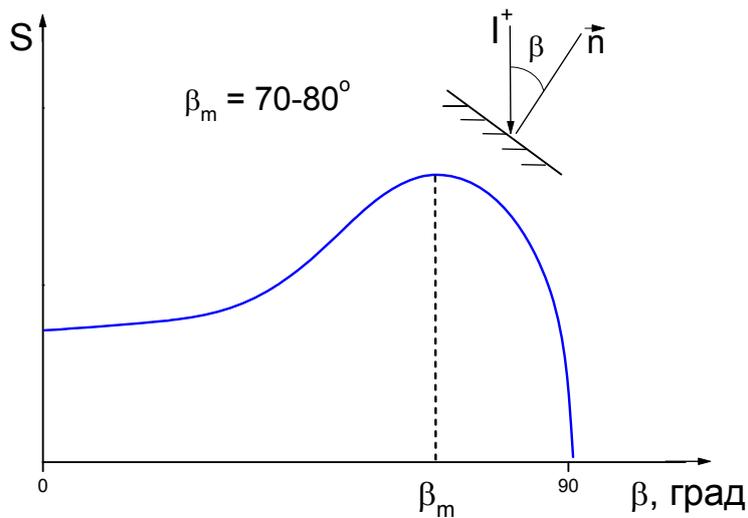


Рис.26. Зависимость коэффициента распыления от угла падения ионов

Такая зависимость объясняется изменением средней энергии, рассеиваемой в поверхностном слое.

При наличии интенсивного распыления при больших дозах облучения профиль распределения примеси существенно изменяется вследствие уноса вещества с поверхности. В этом случае профиль распределения описывается следующей функцией

$$N(x) = \frac{N_0}{2S} \left\{ \operatorname{erf} \left[\frac{\left(x - R_p + \frac{\Phi S}{N_0} \right)}{\sqrt{2\Delta R_p}} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{(x - R_p)}{\sqrt{2\Delta R_p}} \right] \right\} \quad (19)$$

Здесь N_0 - концентрация атомов в имплантированном образце,

$\operatorname{erf} z = (2/\sqrt{\pi}) \int_0^z e^{-t^2} dt$ - интеграл ошибок (error function - функция ошибок),

ошибок),

$\operatorname{erfc} z = 1 - \operatorname{erf} z$ - дополнительная функция ошибок.

В случае больших доз наступает насыщение профиля

$$N(x) = \frac{N_o}{2S} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - R_p}{\sqrt{2\Delta R_p}} \right) \quad (20)$$

Максимально достижимая концентрация примеси при наличии распыления равна

$$N_{\max} = \frac{N_o}{S} \quad (21)$$

Отжиг радиационных нарушений

Понятие «отжиг» содержит 2 аспекта:

во-первых, это метод обработки, заключающийся в повышении температуры, и, во-вторых, это структурные превращения в материале, активируемые этим воздействием.

Рекристаллизация нарушений после ионной бомбардировки слоев является одной из важнейших операций в проблеме применения этого метода для легирования полупроводников, т.к. при этом происходит как электрическая активация примеси, так и устранение дефектов структуры. До недавнего времени отжиг обычно проводился в термических печах в течение длительного времени. Однако с середины 70-х годов, с момента открытия лазерного отжига в Казанском ФТИ, отжиг обычно проводится в режиме импульсного энергетического воздействия: лазерного, электронного, импульсного светового некогерентного, импульсного ионного и т.п.

В целом, импульсный отжиг любым энергетическим воздействием имеет много общего вне зависимости от его вида, хотя и существуют значительные отличия, обусловленные как распределением выделенной энергии по глубине, так и длительностью воздействия и механизмами передачи энергии и кристаллизации. Существуют два основных механизма рекристаллизации. Первый механизм (жидкофазный механизм) реализуется при

малых длительностях импульсов (например, лазерное воздействие с наносекундной длительностью) и связан с плавлением приповерхностного слоя и кристаллизацией из жидкой фазы. Второй механизм (твердофазной эпитаксиальной кристаллизации) осуществляется в частности в режиме миллисекундного лазерного отжига.

ИОННО-ЛУЧЕВОЙ УСКОРИТЕЛЬ ИЛУ-3

Ионно-лучевой ускоритель ИЛУ-3 предназначен для получения в условиях высокого вакуума моноизотопных пучков однозарядных ионов различных элементов с энергией до 100 кэВ при ионном токе в несколько миллиампер. При использовании пучков двух-, трех- и четырехзарядных ионов энергетический интервал может быть расширен до 200 - 300 кэВ.



Рис.27. Внешний вид ускорителя ИЛУ-3

По принципу действия ускоритель аналогичен масс-спектрометру секторного типа с симметричным расположением источника и коллектора ионов относительно магнитного анализатора.

Ускорение ионов в установке ИЛУ-3 производится в два приема: до 50 кэВ в области ионно-оптической системы источника и дополнительно такую же энергию однозарядные ионы получают в области приемника.

Принципиальная схема установки показана на Рис.28.

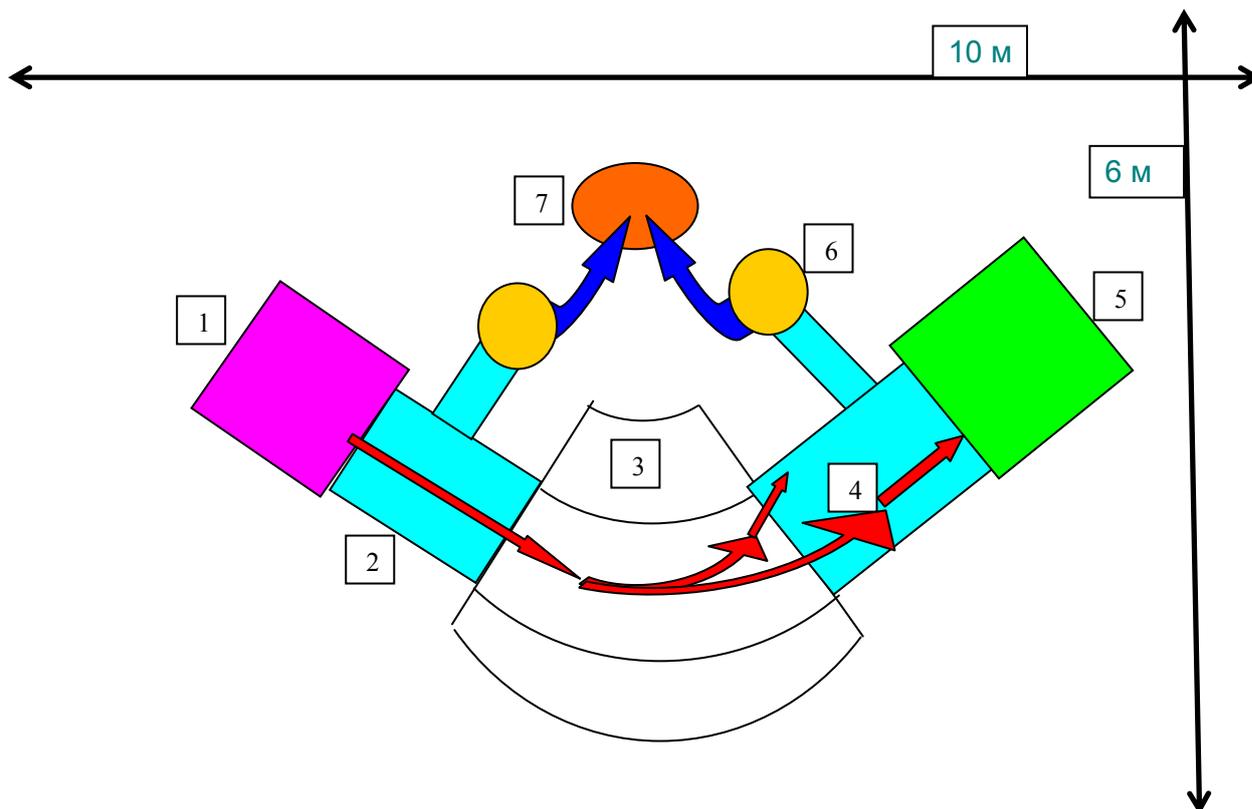


Рис.28. Схематическое изображение ионно-лучевого ускорителя ИЛУ-3:
 1 – источник ионов, 2 – ионопровод, 3 – магнит масс-сепаратора, 4 - траектория ионов, 5 – приемник ионов, 6 – диффузионные насосы, 7 - форвакуумный насос.

Установка состоит из:

1. Источника ионов (1) с системами напуска, формирования и ускорения пучка ионов;
2. Приемника ионов (5) с системой послеускорения и блоком контроля ионного тока и дозы;
3. Вакуумной камеры (2);
4. Масс- сепаратора (3);
5. Системы сканирования;
6. Вакуумных насосов (6 и 7);
7. Блоков питания магнита и высокого напряжения.

Блок источника ионов

Внешний вид источника показан на Рис.29.

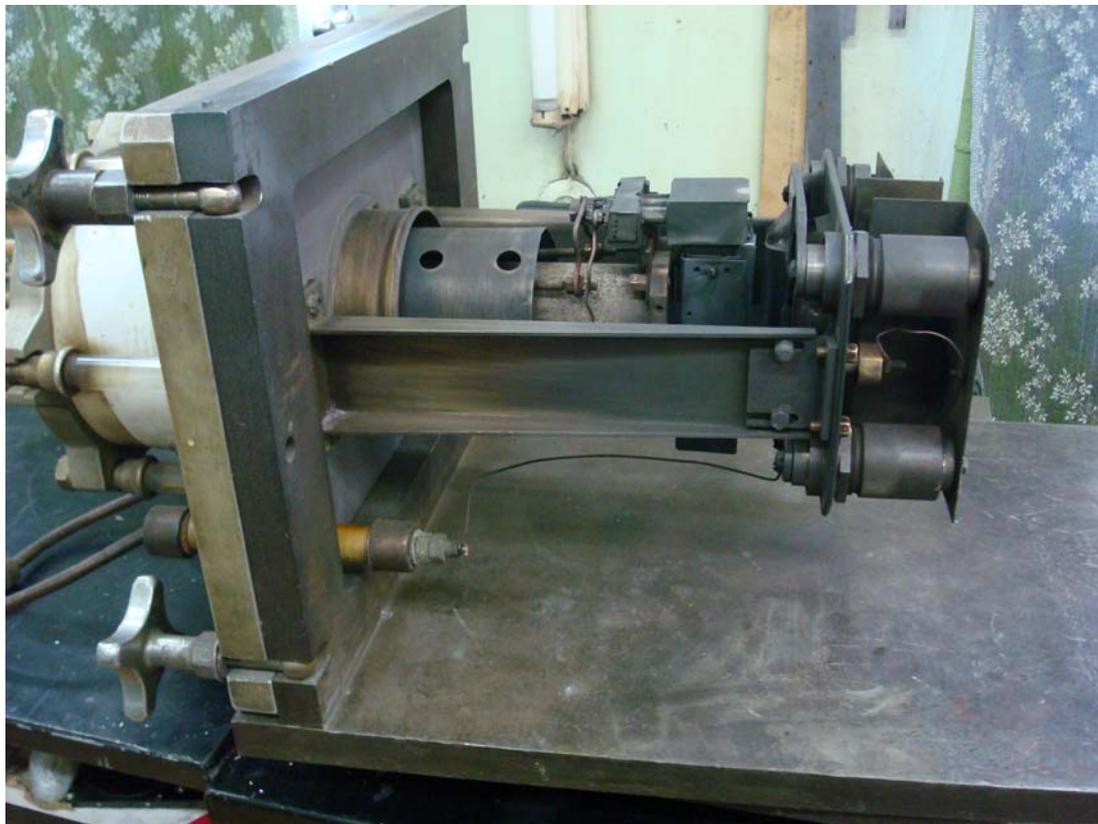


Рис.29. Внешний вид источника ионов

Блок источника служит для генерации ионов, формирования и ускорения ионного тока (см. Рис.30).

Генерация ионов осуществляется в плазме дугового разряда. Исходным рабочим веществом служит либо газ, напускаемый в газоразрядную камеру через калиброванный натекатель, либо твердое вещество, обычно в виде химического соединения с низкой температурой возгонки и высоким давлением паров. Рабочее вещество (1) загружается в тигель (2), изготовленный из нержавеющей стали или графита и расположенный внутри цилиндрической печи (3). Тигель соединен трубкой с задней стенкой газоразрядной камеры (4). Сверху под газоразрядной камерой расположен ка-

тод косвенного накала (5). Эмиттированные катодом электроны входят в газоразрядную камеру через коллимирующее отверстие в крышке камеры. В газоразрядной камере поддерживается дуговой разряд между катодом и анодом (6) в парах рабочего вещества, которые поступают в область разряда тигеля. Анодом служит дно газоразрядной камеры. Для предотвращения конденсации паров рабочего вещества на стенках газоразрядной камеры ее боковая поверхность обогревается излучением специального проволочного нагревателя (сухопарника), закрепленного снаружи на газоразрядной камере. Контролируемая термпарой температура тигеля может регулироваться в пределах от комнатной до 900°C путем изменения мощности, подводимой к нагревателю ($V_{\text{печи}}$). Рабочая температура тигеля должна обеспечивать давление паров в газоразрядной камере порядка $(2...5) \times 10^{-2}$ мм рт.ст., которое необходимо для стабильного поддержания дугового разряда.

Газоразрядная камера с дуговым разрядом расположена между полюсами вспомогательного электромагнита, который играет двойную роль. Во-первых, благодаря положению продольного магнитного поля напряженностью 400-500 Э, поток выходящих из катода электронов, а вместе с ним и дуговой разряд в целом, концентрируется вдоль силовых линий магнитного поля, и режим горения дуги становится более устойчивым, образуя плазменный шнур (7). Во-вторых, для того, чтобы в установке ИЛУ-3 ионный пучок имел вертикальный фокус в средней части магнитного анализатора, плазменному шнуру в источнике необходимо придать кривизну с $R \approx 900$ мм. Это достигается расположением источника в поле рассеяния вспомогательного магнита таким образом, чтобы дуговой разряд совпадал с той областью поля, где магнитные силовые линии имеют такую кривизну.

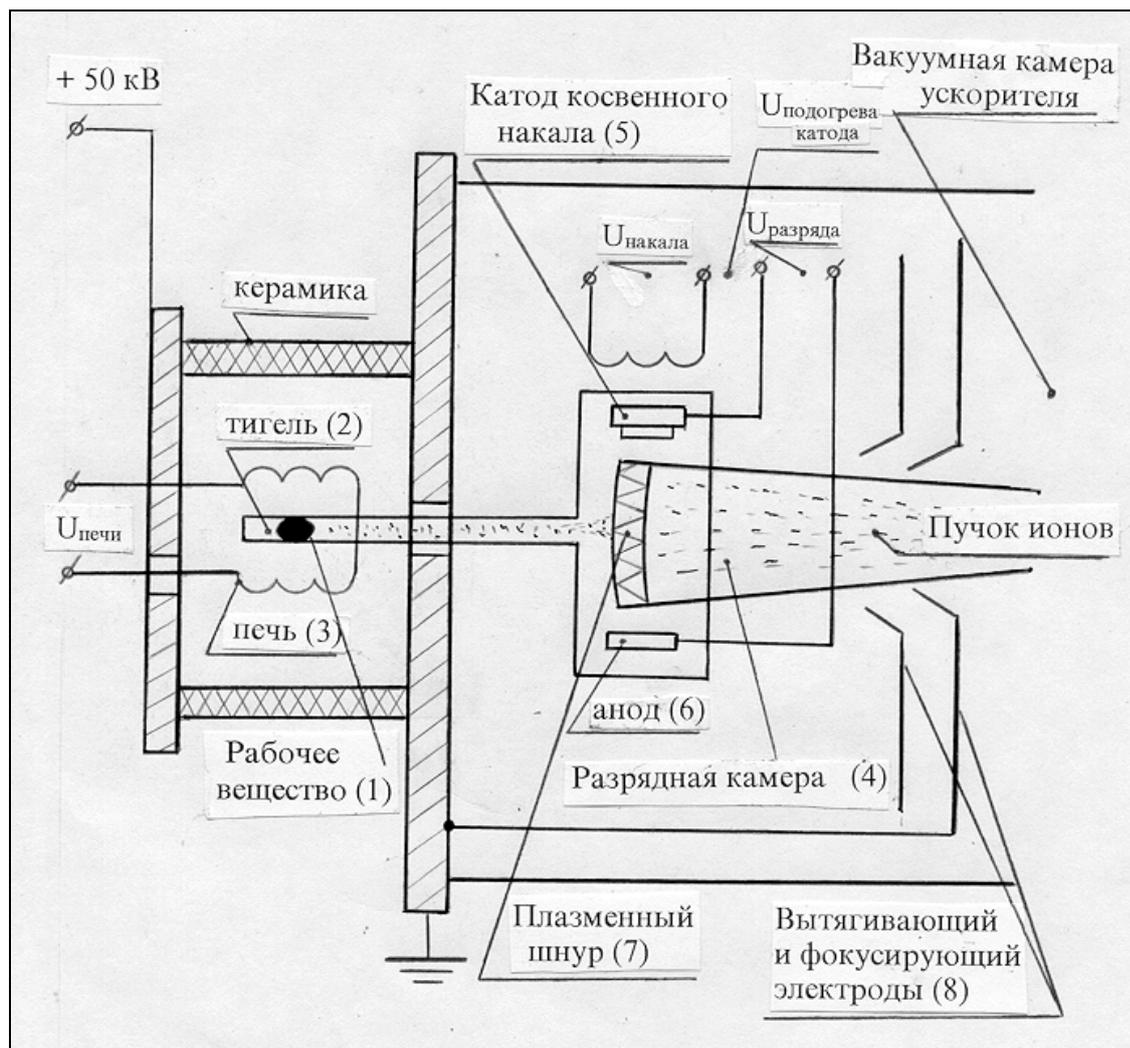


Рис.30. Схематическое изображение источника ионов ускорителя ИЛУ-3

В передней стенке газоразрядной камеры имеется эмиссионная щель высотой 80 мм и шириной 1 - 2 мм. Через эту щель ионы вытягиваются из плазмы дугового разряда, фокусируются ионно-оптической системой (8), ускоряются до требуемой энергии и поступают в пространство дрейфа, где на участках от источника ионов до входной границы магнитного поля анализатора и от выходной границы этого поля до заземленного электрода приемника на них не действуют никакие электрические или магнитные поля кроме электрического дефокусирующего поля объемного заряда самого пучка.

В процессе работы источник ионов охлаждается проточной водой. Для того, чтобы уменьшить утечки по воде, последняя поступает через длинный водяной дроссель (диэлектрический шланг большой длины).

Электромагнитный анализатор (масс-сепаратор)

В ИЛУ-3 применен электромагнитный анализатор с углом сектора 60° с однородным магнитным полем, направленным вертикально, перпендикулярно пучку ионов. В области анализатора ионы движутся по круговым траекториям, радиус которых при заданном значении напряженности магнитного поля и энергии ионов E зависит от массы ионов M_1 и определяется из хорошо известного соотношения:

$$R = \frac{1}{eH} \sqrt{2M_1 E} \quad (22)$$

где e - заряд электрона.

Средний радиус траектории ионов в анализаторе равен $R_0 = 500$ мм, максимальная ширина пучка в средней плоскости анализатора составляет ~ 120 мм.

При величине межполюсного зазора 90 мм максимальная напряженность магнитного поля в зазоре достигает ~ 5500 Э. Масс-сепаратор имеет отдельное питание через мотор-генератор, т.е. электродвигатель переменного тока, на одном валу с которым помещен генератор постоянного тока. Такое устройство позволяет избежать применения мощных трансформаторов и выпрямителей. Обмотки магнита масс-сепаратора охлаждаются проточной водой. Максимальный ток магнита до 200 А, что соответствует ~ 60 тыс. ампер-витков.

Блок питания ионного источника

Блок питания ионного источника находится под высоким напряжением, получаемым с помощью серийного выпрямителя ВС-50-50 ($V_{\max} = 50$ кВ, $J_{\max} = 50$ мА) и включает в себя следующие узлы:

1. Выпрямитель дуги;
2. Выпрямитель подогрева катода;
3. Выпрямитель нити накала;
4. Выпрямитель печи;
5. Выпрямитель нагревателя газоразрядной камеры;
6. Блок стабилизации тока дуги.

Управление блоком питания осуществляется через высоковольтные разделительные трансформаторы.

Для осуществления сканирования ионного пучка по образцу используется пилообразная модуляция ускоряющего напряжения. Для этого промодулированный ВЧ сигнал с частотой 1 МГц подается через высоковольтный разделительный конденсатор и детектор на сетку стабилизирующей выходной лампы (см. Рис.31).

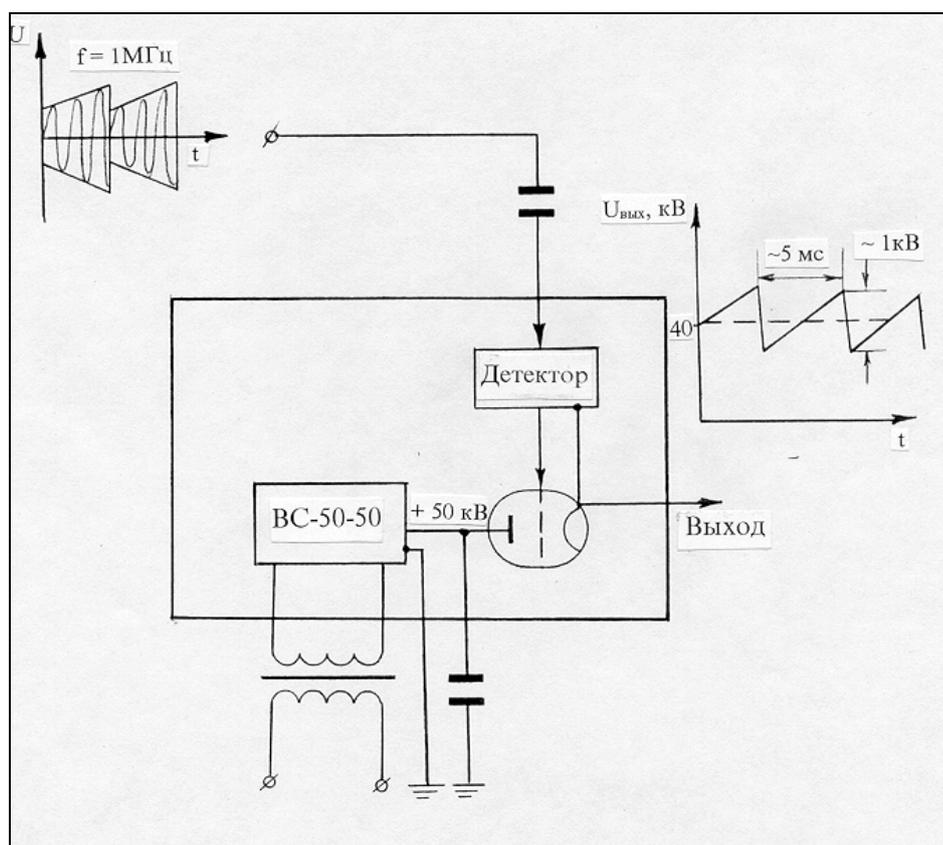


Рис.31. Блок питания источника ионов

Таким образом, амплитуда высокого напряжения 40 кВ промодули-

рована пилой с частотой 200 Гц и амплитудой ~ 1 кВ. В этом случае ионы с равной массой, но разной энергией будут отклоняться в масс-сепараторе на разный угол, чем и обеспечивается сканирование пучка по всему образцу. Отличие в энергии ионов на краях образца с размером в направлении сканирования ~ 10 см составляет не более 3 %, что практически не сказывается на профилях распределения пробегов и процессах дефектообразования.

Приемник ионов

Для решения различных задач ионной бомбардировки существует несколько типов приемников.

1. Обычный приемник.
2. Низкотемпературный приемник, в котором температура образца во время имплантации может быть понижена до ~ 100 К путем охлаждения кассеты с образцом с помощью жидкого азота.
3. Высокотемпературный приемник, в котором температура образца во время облучения может поддерживаться постоянной в пределах 300...1000 К.
4. Приемник с дополнительным механическим сканированием. В таком приемнике предусмотрено механическое перемещение образца по вертикали с частотой ~ 1 Гц для улучшения однородности имплантации. Обычно по вертикали ионный пучок на образце не однороден. Такая неоднородность возникает из-за неравномерной ионизации атомов в газоразрядной камере вследствие пространственного распределения скоростей заряженных частиц.
5. Приемник с одновременным напылением. В таком приемнике осуществляется одновременно имплантация ионов, а также распыление дополнительной мишени ионным пучком и напыление этих атомов на образец. Такой метод называется ионно-стимулированным осаждением.

ем («ion assisted deposition») и используется для получения тонких пленок с высокой адгезией к подложке.



Рис.32. Внешний вид высокотемпературного приемника ионов

Схема обычного приемника ионов показана на Рис.33.

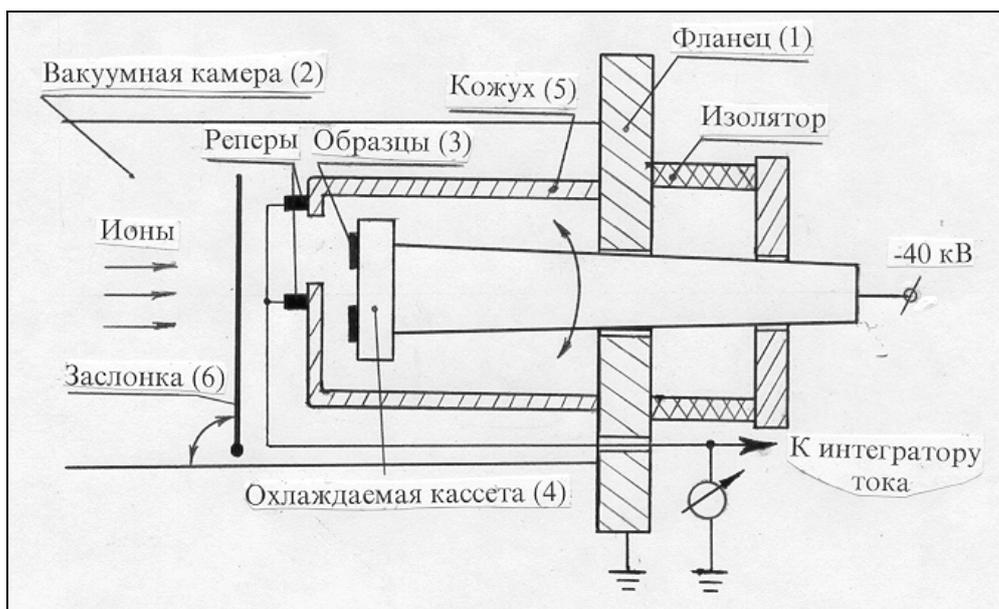


Рис.33. Принципиальная схема приемника ионов ускорителя ИЛУ-3
Приемник ионов смонтирован на фланце (1), закрывающем вакуум-

ную камеру (2) ионопровода. Образцы (3) - обычно 4-8 шт. - закреплены на кассете (4), охлаждаемой водой и закрытой кожухом (5) от конденсации паров масла на образцы. Поток ионов может перекрываться заслонкой (6). На кассету может подаваться потенциал (до - 40 кВ) относительно корпуса для дополнительного послеускорения ионов. Смена бомбардируемых образцов производится поворотом кассеты до совмещения с окном в кожухе.

Плотность ионного тока производится измерением тока стекания зарядов с двух реперов, с калиброванной площадью ($2 \times 0,5 \text{ см}^2$) расположенных рядом с окном. Интегрированием ионного тока производится измерение дозы имплантации.

Вакуумная система

Вакуум в рабочей камере ускорителя, необходимый для получения и транспортировки ионов к образцу, обеспечивается трехступенчатой вакуумной системой.

Предварительная откачка камеры осуществляется ротационными масляными насосами типа ВН-1 (2 шт. + 1 резервный). На входных патрубках этих насосов установлены автоклапаны, которые автоматически перекрывают вакуумпровод в случае внезапного отключения напряжения или других нарушений электропитания форвакуумных насосов.

Высокий вакуум достигается двумя паромасляными диффузионными агрегатами ВА-2-ЗПР, один из которых подсоединен к камере источника, второй - к камере приемника. Скорость откачки таких агрегатов ~1000л/сек.

Для эффективного вымораживания паров масла диффузионных насосов, помимо основных азотных ловушек, входящих в комплект вакуумных агрегатов, установлены дополнительно азотная ловушка в трубке, соединяющем диффузионный насос с камерой источника, и азотная ловушка

в патрубке между камерой приемника и вторым диффузионным насосом. Кроме того, для предотвращения конденсации компонентов паров рабочего вещества, выходящих из ионного источника, на поверхности облучаемых образцов, между центральной камерой и отсеком приемника установлена еще одна ловушка, охлаждаемая жидким азотом.

Основные физико-технические параметры установки ИЛУ-3

1. Энергия однозарядных ионов	до 100 кэВ
двух и трехзарядных ионов	до 300 кэВ
2. Максимальная напряженность магнитного поля анализатора	5500 Э
3. Угол горизонтальной расходимости ионного пучка	$\pm 3^{\circ}$
4. Величина дисперсии масс	5 мм на 1% $\Delta M/M$
5. Площадь, обрабатываемая сканирующим пучком на приемнике	20 - 50 см ²
6. Максимальная температура тигеля источника	900 ⁰ С
7. Рабочее давление в камере источника	$(3 - 5) \times 10^{-5}$ мм рт.ст.
приемника	5×10^{-6} мм рт.ст.
8. Вес установки (без системы электропитания)	6 тонн
9. Расход воды на охлаждение электромагнита	650 л/час
на охлаждение агрегатов и узлов	7500 л/час
10. Потребляемая мощность	45 кВт
11. Площадь для размещения (без насосов ВН-1)	58м ²

ОБЩИЙ ПОРЯДОК РАБОТЫ НА УСКОРИТЕЛЕ ИЛУ-3 И ВЫПОЛНЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1. Рассчитать по заданию преподавателя режимы имплантации для проведения ионно-лучевого синтеза.
2. Закрепить образцы на кассете, установить кассету в приемник ионов.
 - Закрывать кассету кожухом, закрыть задвижку, вставить и закрепить фланец приемника на ионопроводе.
 - Подсоединить необходимые соединительные провода к фланцу приемника.
 - Подсоединить систему водяного охлаждения к приемнику.
- 3.-Поместить необходимое рабочее вещество в тигель и закрепить его в печи источника ионов.
 - Собрать источник ионов с точным соблюдением всех размеров ионно-фокусирующей системы.
 - Вставить и закрепить фланец источника на переднем конце ионопровода.
 - Подсоединить кабели питания узлов источника и высоковольтные провода к клеммам на фланце.
 - Подсоединить систему водяного охлаждения источника.
- 4.-Откачать вакуумную камеру форвакуумными насосами до давления $\sim 10^{-3}$ мм рт.ст.
 - Откачать вакуумную камеру диффузионными насосами и криогенными системами до давления $\sim 5 \times 10^{-6}$ мм рт.ст. (в районе приемника).
- 5.-Включить водяное охлаждение узлов установки.
 - Включить блок электропитания источника.

- Установить необходимые режимы в системах питания печи, сухопарника, накала катода и разряда.
 - Включить питание дополнительного электромагнита источника.
 - Включить мотор-генератор и подать питание на магнит анализатора.
 - Поднять высокое напряжение до требуемой величины.
- 6.-Настроить ускоритель на требуемый пучок ионов.
- Регулировкой режимов подобрать необходимый ионный ток.
 - Установить необходимые режимы работы приемника ионов.
 - Открыть заслонку и включить интегратор.
 - При наборе необходимой дозы, заслонку закрыть.
 - Сменить образец и вновь произвести облучение.
- 7.-После окончания облучения.
- Постепенно снизить высокое напряжение и выключить блок источника ионов и электропитание установки.
- Охладить источник и закрыть шиберы высоковакуумных агрегатов.
 - Напустить воздух в камеру.
 - Снять приемник и извлечь образцы.

Примечание. Практическая работа на ускорителе, включение и выключение установки и ее отдельных блоков и приборов производится в полном соответствии с техническим описанием ускорителя и выполнением техники безопасности при обязательном присутствии оператора.

Контрольные задачи и вопросы для самоподготовки

Задача 1.

Найти концентрацию внедренных ионов в максимуме распределения, если имплантация производилась ионами Fe^+ в Si при энергии 40 кэВ (средний проецированный пробег равен 35 нм, стандартное отклонение 15нм), время облучения 15 мин., плотность ионного тока 10 мкА/см². Эффектами распыления и перераспределения внедренных атомов пренебречь.

Задача 2.

Найти концентрацию атомов примеси в кремнии на глубине $R_p + 2 \cdot \Delta R_p$ при имплантации ионов $^{27}Al^+$ с энергией 40кэВ и дозой $\Phi = 1 \cdot 10^4$ мкКл/см². Эффектом распыления пренебречь.

Задача 3.

Найти концентрацию атомов примеси в кремнии на глубине $R_p + 2 \cdot \Delta R_p$ при имплантации ионов $^{27}Al^+$ с энергией 40кэВ и дозой $\Phi = 1 \cdot 10^4$ мкКл/см². Эффектом распыления пренебречь.

Задача 4.

Определить режим имплантации (E, Φ , $t_{обл.}$). при легировании кремния ионами фосфора. Максимум ионов фосфора должен находиться на глубине 50 нм, при этом концентрация внедренных атомов в максимуме распределения должна быть 10^{19} ат/см³. выбрать плотность тока равной 1 мкА/см². Атомная плотность кремния составляет $N_0 = 5 \cdot 10^{22}$ ат/см³.

Задача 5.

Чему равна толщина распыленного слоя при имплантации ионов Co^+ в Si, если коэффициент распыления равен $S = 1,5$ ат/ион, доза имплантированных ионов $\Phi = 4 \cdot 10^4$ мкКл/см², атомная плотность кремния $N_0 = 5 \cdot 10^{22}$ ат/см³?

Задача 6.

При ионной имплантации в результате распыления образовалась

ступенька на границе облученной и необлученной части образца. Какова величина этой ступеньки, если облучение проводилось однозарядными ионами при плотности ионного тока 1 мкА/см^2 в течение 180 минут, а коэффициент распыления составил $S=2$ ат/ион? Плотность атомов в материале мишени составляла $N_0=8 \cdot 10^{22} \text{ ат/см}^3$.

Задача 7.

Определить режимы имплантации ($E, \Phi, t_{\text{обл}}$) при ионном легировании кремния фосфором. Исходные параметры: пластина монокристаллического кремния, разориентированная для устранения эффекта каналирования. Максимум ионов фосфора должен находиться на глубине 50 нм, при этом концентрация внедренных атомов в максимуме должна быть 10^{19} ат/см^3 . Выбрать плотность ионного тока равным 1 мкА/см^2 . Эффектами распыления и перераспределения внедренных атомов пренебречь. Атомная плотность кремния $N_0 = 5 \times 10^{22} \text{ ат/см}^3$.

Вопросы.

1. Как зависит величина ступеньки, возникающей в результате радиационного распухания (свеллинга) от плотности потока ионов при неизменных характеристиках мишени (K_1, E_d, D, τ, T_s) и параметрах пучка ($E, t_{\text{облучения}}$)?
2. При имплантации ионов в германий произошла полная аморфизация приповерхностного слоя. Для каких имплантированных ионов ^{31}P или ^{56}Fe доза аморфизации будет меньше и почему? Параметры пучка и условия облучения одинаковы в обоих случаях
3. Как влияет облучение ионами на диффузию атомов в кристалле?
4. К чему обычно приводит наличие селективного травления?
5. Какова основная причина значительного увеличения проводимости при больших дозах имплантации в полимеры?

6. Где, по вашему мнению, будет больше концентрация внедренных атомов в максимуме распределения при имплантации ионов железа в различные мишени: монокристаллический Si или аморфный Si и почему?
7. В ионном ускорителе используется магнитный масс-сепаратор ионов. Однозарядные ионы $^{35}\text{Cl}^+$ и $^{16}\text{O}^+$ имеют одинаковую энергию E и имплантируются одновременно в мишень. Под действием постоянного магнитного поля H_0 ионы начинают двигаться по круговым орбитам с радиусом R . Показать, какой из ионов отклонится на больший угол после прохождения масс-сепаратора (найти зависимость $R=R(E, H, M)$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Х.Риссел, И.Руге. Ионная имплантация. - М.: Наука, 1983. - 360 с.
2. И.А.Аброян, А.Н.Андронов, А.И.Титов. Физические основы электронной и ионной технологии. - М.: Высшая школа, 1984.-320с.
3. Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. Введение в физику поверхности. М.: Наука, 2006. – 490 с.
4. А.И.Гусев. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнология. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.- 416 с.
5. Н.Г.Рамбиди, А.В.Березкин. Физические и химические основы нанотехнологий. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.- 456 с.
6. Ионный ускоритель ИЛУ-3. Техническое описание. Сост.:В.М.Гусев, С.М.Нафтулин, Н.И.Соколов.- М.-1968.
7. Головин Ю.И. Введение в нанотехнологию. М.: Изд-во Машиностроение-1, 2003.
8. В.Ф.Попов, Ю.Н.Горюнов. Процессы и установки электронно-ионной технологии. - М.: Высшая школа, 1986. - 255 с.
9. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии.- М.: Техносфера, 2004.- 328 с.