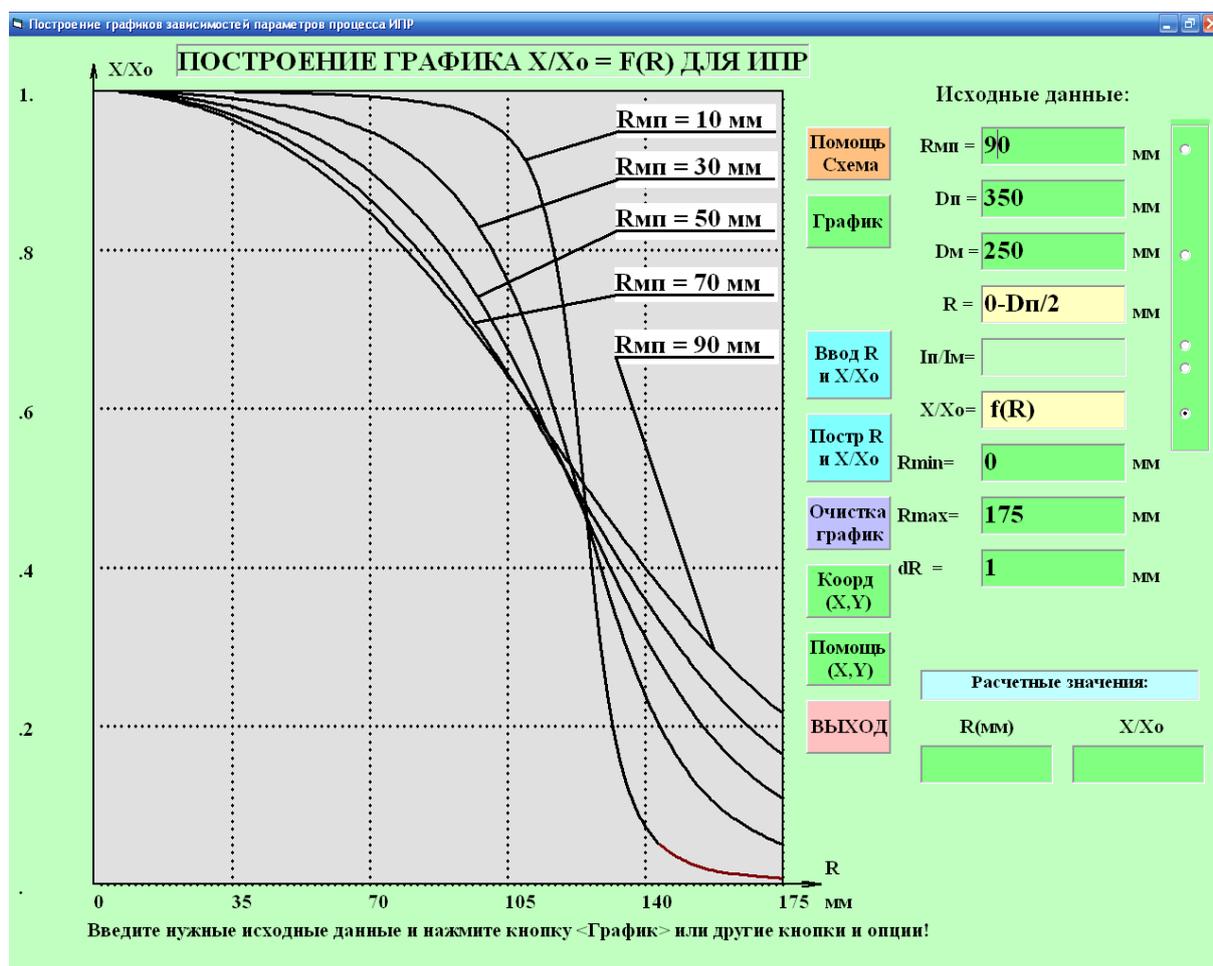


**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ и НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное агентство по образованию  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ  
ЭЛЕКТРОНИКИ И МАТЕМАТИКИ  
(Технический университет)**

**Кафедра физических основ электронной техники**

**Методические указания к лабораторной работе  
Моделирование распределения осаждаемых  
частиц по поверхности подложки при ионно-  
плазменном нанесении тонких пленок**



**Москва – 2011**

*Составители канд. хим. наук, проф. Ф.И.Григорьев;  
канд. техн. наук, доцент А.А.Чернов*

*Кратко изложены физические основы процессов ионно-плазменного нанесения тонких пленок в технологии микроэлектроники. Представлена математическая модель расчета отношения плотности потока распыляемого вещества от поверхности мишени к плотности потока осаждаемого вещества на поверхность подложки, а также распределения толщины тонкопленочного покрытия по поверхности подложки при проведении процессов ионно-плазменного нанесения. Представлено описание программного обеспечения для расчета геометрических параметров процесса ионно-плазменного нанесения. Описана методика выполнения лабораторной работы.*

*Предназначены для студентов IV-го и V-го курсов специальностей 210104-«Микроэлектроника и твердотельная электроника» и 221400 – «Управление качеством».*

*Моделирование распределения осаждаемых частиц по поверхности подложки при ионно-плазменном нанесении тонких пленок: Метод. указания к лаб. работе / Московский государственный ин-т электроники и математики; Сост. Ф.И.Григорьев, А.А.Чернов. М.,2011. 32 с.*

*Ил. 12. Библиогр.: 5 назв.*

*ISBN 978-5-94506-284-9*

## **Лабораторная работа**

# **Моделирование распределения осаждаемых частиц по поверхности подложки при ионно-плазменном нанесении тонких пленок**

### **1. Цель лабораторной работы**

Целью работы является:

- изучение математической модели распределения потоков распыляемого вещества от мишени и на поверхность пластины, а также распределения толщины тонкопленочного покрытия по поверхности подложки при проведении процессов ионно-плазменного распыления;
- изучение возможностей программного обеспечения для расчета геометрических параметров системы распыления для процесса ионно-плазменного распыления;
- проведение расчета геометрических параметров системы распыления для процесса ионно-плазменного нанесения с целью получения заданного распределения толщины тонкопленочного покрытия по поверхности подложки.

### **2. Введение**

Получение высококачественных тонких пленок металлов, диэлектриков и полупроводников является одной из актуальных задач технологии изготовления различных элементов микроэлектроники.

До 70-х годов XX века для получения тонких пленок использовался в основном метод вакуумного термического испарения (испарение и конденсация вещества в высоком вакууме), который характеризуется простотой и высокими скоростями осаждения, но не обеспечивает достаточной воспроизводимости свойств пленочных покрытий, в особенности при осаждении веществ сложного состава. Кроме того, в процессе испарения материалов (особенно с низкой теплопроводностью) может происходить вылет крупных частиц, что является причиной появления поверхностных дефектов и нарушения непрерывности пленочного покрытия.

Расширение номенклатуры материалов, используемых при получении элементов микроэлектроники, и тенденция перехода к непрерывным технологическим процессам вызвали интенсивное развитие ионно-плазменных процессов осаждения тонкопленочных слоев.

Существующие в настоящее время методы осаждения тонких пленок с использованием низкотемпературной плазмы и ионного луча дают возможность получать пленки различных материалов (в том числе тугоплавких и многокомпонентного состава), которые практически

невозможно получить методом вакуумного термического испарения. Ионно-плазменные методы осаждения пленок дают возможность создания установок и линий непрерывного действия и позволяют осуществить полную автоматизацию всего цикла получения покрытия. Развитие ионно-плазменных процессов получения тонких пленок идет в направлении повышения качества пленок (снижение загрязнений и радиационных дефектов) и повышения производительности процессов.

### **3. Формирование пленок материалов в процессах ионно-плазменного нанесения**

#### **3.1. Характеристика процесса ионно-плазменного нанесения**

В процессах ионно-плазменного распыления осаждаемый на подложку материал получают путем распыления твердотельной мишени энергетическими ионами. Одним из важнейших отличий ионно-плазменного распыления от вакуумного термического испарения является высокая энергия распыленных частиц (3-5 эВ) по сравнению с испаренными (0,15 эВ при  $T_{исп} \sim 2000$  К), что позволяет осаждающимся частицам частично внедряться в подложку, обеспечивая высокую адгезию пленки к подложке. Кроме того, ионно-плазменное нанесение обладает еще целым рядом достоинств, таких как:

- возможность получения пленок тугоплавких и неплавящихся материалов, поскольку процесс распыления не требует расплавления материала;
- сохранение стехиометрического состава пленок при осаждении многокомпонентных материалов;
- высокая энергия осаждаемых частиц обеспечивает снижение минимальной температуры эпитаксиального роста;
- возможность получения пленок различных соединений (например, окислов или нитридов) при введении в газоразрядную плазму химически активных (*реактивных*) газов;
- возможность очистки подложки и растущей пленки ионной бомбардировкой до, в процессе и после окончания процесса нанесения.

В ионно-плазменном процессе распыляемая мишень и подложка находятся непосредственно в газоразрядной плазме. Поэтому формирование пленок в процессе ионно-плазменного нанесения протекает в сложных условиях из-за сравнительно высокого рабочего давления (до  $\sim 10$  Па), неопределенности энергии ионов и распыленных частиц.

При ионно-лучевом нанесении распыляемая мишень и подложка находятся вне плазмы. Распыление мишени осуществляется пучком ионов, направляемым на мишень из автономного источника. Поскольку в этом случае на мишень и подложку не воздействуют другие частицы и излучение плазмы, то ионно-лучевое нанесение можно рассматривать как некую идеализацию ионно-плазменного нанесения.

Для того, чтобы проанализировать ионно-плазменный процесс нанесения пленок целесообразно разделить его на три основных этапа:

- распыление материала мишени,
- перенос распыленного материала в пространстве мишень – подложка,
- осаждение материала на подложке.

### **3.2. Распыление материала мишени**

Этап распыления мишени определяет вид и исходное количество материала, который может быть осажден на подложке, исходную энергию распыленных частиц и их пространственное распределение.

Бомбардировка твердотельной мишени энергетическими ионами вызывает распыление материала мишени, если энергия бомбардирующего иона превышает некоторое пороговое значение. При распылении происходит передача кинетической энергии бомбардирующего иона атомам твердого тела и последующий вылет через поверхность тех частиц, энергия которых достаточна для преодоления поверхностных сил со стороны твердого тела.

Эффективность распыления характеризуют коэффициентом распыления  $Y$ , который определяется как среднее число атомов, удаляемых с поверхности твердого тела одним бомбардирующим ионом. Для характеристики распыления многокомпонентных материалов используют парциальные коэффициенты распыления отдельных компонентов

При облучении твердого тела ионным пучком, направленным по нормали к поверхности, коэффициент распыления (в приближении линейного каскада) равен:

$$Y = 0,042 \frac{\alpha_S \left( M_2 / M_1 \right) \cdot S_n(E)}{U_0}, \quad (3.1)$$

где  $S_n(E)$  – сечение упругого торможения иона в материале твердого тела, зависящее от энергии иона  $E$ ;

$U_0$  – энергия связи поверхностных атомов твердого тела;

$\alpha_S(M_2/M_1)$  – коэффициент, определяемый отношением масс атома твердого тела и бомбардирующего иона (рис.3.1).

Возрастание коэффициента  $\alpha_S$  с увеличением отношения масс  $M_2/M_1$  обусловлено в основном увеличением вклада случаев рассеяния на большой угол при уменьшении массы иона в результате чего часть каскадов столкновений оказывается сосредоточена вблизи поверхности. При  $(M_2/M_1) < 1$  ион движется в твердом теле практически прямолинейно, и большинство столкновений в каскаде происходит далеко от поверхности, откуда выход атомов в вакуум затруднен. Следовательно, при равных удельных энергетических потерях легкие ионы распыляют мишень с большей эффективностью, чем тяжелые.

Для практики важными характеристиками распыления являются зависимости коэффициента распыления от энергии бомбардирующих ионов и угла их падения относительно нормали к поверхности.

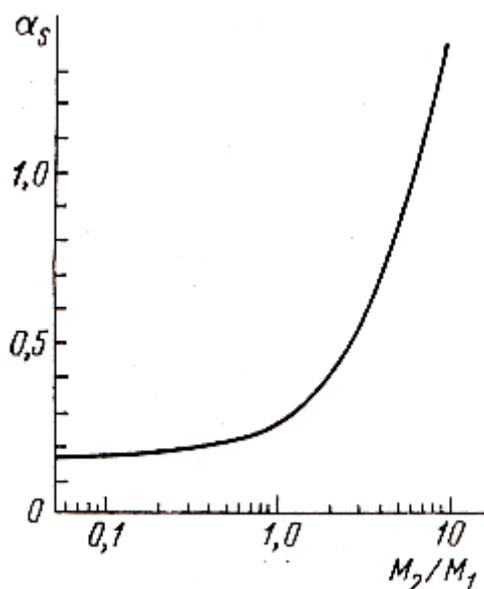


Рис.3.1. Зависимость коэффициента  $\alpha_s$  от отношения масс атома твердого тела и бомбардирующего иона.

Зависимость коэффициента распыления от энергии иона полностью определяется зависимостью от энергии сечения упругого торможения. Зависимость коэффициента распыления от угла падения ионов (вплоть до  $\theta \sim 70^\circ$ ) в общем случае имеет вид:

$$Y(\theta) = Y(0) \cdot (\cos(\theta))^{-f} \quad (3.2)$$

Обычно показатель степени  $f$  равен  $5/3$ . Однако для легких ионов при выполнении условия  $M_2/M_1 \gg 1$  наиболее хорошее соответствие с экспериментальными результатами дает зависимость  $1/(\cos(\theta))$ . Значение угла, соответствующего максимальному коэффициенту распыления, определяется выражением:

$$\theta_{\max} = \frac{\pi}{2} \left[ \frac{5\pi \cdot a_0^2 \cdot N^{2/3} \cdot Z_1 \cdot Z_2 \cdot E_R}{E_1 \cdot \left( Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3} \right)} \right]^{1/2} \quad (3.3)$$

где  $a_0$  – боровский радиус;

$N$  – атомная плотность мишени;

$Z_1$  – атомный номер иона;

$Z_2$  – атомный номер атома мишени;

$E_1$  – энергия бомбардирующего иона;

$E_R$  – относительная энергия иона в системе центра масс.

С ростом энергии ионов значение  $\theta_{max}$  увеличивается, так как возрастает способность иона преодолевать силы отталкивания на поверхности мишени.

Температура мишени практически не влияет на распыление при температурах, далеких от точки плавления. Однако, сильный разогрев приповерхностной области распыляемой мишени за счет ионной бомбардировки, особенно при отсутствии достаточного теплоотвода, способствует усилению диффузионных процессов. Вследствие интенсивного дефектообразования при ионной бомбардировке коэффициент диффузии примесей в распыляемой мишени будет существенно выше, чем при обычной термической диффузии. В случае многокомпонентной мишени это может привести к изменению состава на поверхности. Поэтому необходимо поддерживать относительно низкую температуру распыляемой мишени.

Частицы, удаляемые из твердого тела при распылении, - это преимущественно нейтральные атомы, некоторую долю которых составляют конгломераты атомов (*кластеры*), а также ионы. При ионной бомбардировке по нормали к поверхности аморфных и поликристаллических мишеней пространственное распределение распыленных частиц в первом приближении подчиняется закону косинуса:

$$J(\vartheta) = J(0) \cdot \cos(\vartheta), \quad (3.4)$$

где  $J(\vartheta)$  - интенсивность потока распыленных частиц;

$J(0)$  - интенсивность потока распыленных частиц в направлении нормали к поверхности;

$\vartheta$  - угол вылета распыленных частиц, отсчитываемый от нормали к поверхности.

Однако, как показывает эксперимент, пространственное распределение распыленных частиц зависит от энергии бомбардирующих ионов. При низких энергиях ионов ( $< 1$  кэВ) наблюдается так называемое «подкосинусное» распределение, т.е. большее по сравнению с законом косинуса число частиц распыляется вдоль поверхности и меньшее – по нормали к ней. При энергиях ионов  $> 10$  кэВ преимущественное распыление происходит в направлении нормали к поверхности – так называемое «надкосинусное» распределение.

Вид энергетического спектра распыленных частиц зависит от вида распыляемого материала, угла эмиссии распыленных частиц и слабо зависит от энергии бомбардирующих ионов. Максимум в энергетическом

распределении распыленных частиц соответствует энергии между половинным и полным значениями поверхностной энергии связи материала мишени. Средняя энергия распыленных частиц на 1 – 2 порядка выше энергии испаренных частиц. Некоторое возрастание средней энергии распыленных частиц наблюдается с ростом энергии бомбардирующих ионов до значений  $\sim 1$  кэВ, но при дальнейшем увеличении энергии ионов вид энергетического спектра распыленных частиц остается практически неизменным.

В качестве рабочего газа – источника ионов, бомбардирующих мишень, обычно используют аргон. Присутствие в аргоне примесей, таких как кислород, двуокись углерода, пары воды и вакуумного масла приводит к значительному снижению скорости распыления вследствие образования на поверхности мишени пленок химических соединений, особенно окислов.

При рассмотрении этапа распыления необходимо знать плотность тока и истинную энергию ионов, бомбардирующих распыляемую мишень. При давлениях рабочего газа  $> 10^{-1}$  Па велика вероятность столкновений ионов с атомами газа. В результате таких столкновений возможна перезарядка ионов  $Ar^+ + Ar \rightarrow Ar + Ar^+$ . Ионы, потерявшие заряд, бомбардируют мишень как нейтральные частицы, сохранившие приобретенную ранее кинетическую энергию, а вновь образующиеся ионы обладают более низкой энергией, так как разгоняются меньшей разностью потенциалов. Возникает дисперсия потока ионов по энергиям. Скорость распыления мишени  $V_p$  является в этом случае сложной функцией энергии и распределения по энергиям бомбардирующих ионов:

$$V_p = \frac{M_2}{q \cdot N_A \cdot \rho} \int Y(E) \cdot j(E) \cdot dE, \quad (3.5)$$

где  $M_2$  – масса атомов материала;

$\rho$  – плотность материала;

$q$  – заряд электрона;

$N_A$  – число Авогадро;

$Y(E)$  – коэффициент распыления;

$j(E)dE$  – распределение плотности тока ионов, бомбардирующих мишень по энергиям.

Эффективность ионного распыления определяется массой вещества  $m_p$ , распыляемой в единицу времени с единицы площади, отнесенной к плотности мощности  $W_p$ , затрачиваемой на реализацию процесса распыления:

$$\eta_p = m_p / W_p. \quad (3.6)$$

Плотность мощности  $W_p = j \cdot U$ , где  $U$  - напряжение, ускоряющее ионы.

Процесс ионно-лучевого распыления осуществляется в значительно более «чистых» вакуумных условиях, поэтому на этапе распыления среда в меньшей степени влияет на энергию бомбардирующих ионов и состояние поверхности мишени.

### **3.3. Перенос распыленного материала в пространстве мишень-подложка**

Процессы переноса определяют эффективность доставки распыленного материала на подложку и энергию осаждающихся частиц.

Характер движения распыленных частиц материала в пространстве мишень – подложка определяется вероятностью рассеяния частиц на атомах рабочего газа, т.е. зависит от давления и расстояния мишень – подложка. При малых давлениях и малых расстояниях перенос распыленных частиц происходит практически по прямолинейным траекториям, поскольку при таких условиях вероятность рассеяния частиц очень мала. По оценкам весь распыленный материал будет достигать подложки при условии, что произведение  $pD < 4$  Па·см, где  $p$  – давление в пространстве переноса;  $D$  – расстояние мишень – подложка.

При высоких давлениях часть распыленных частиц в результате многократных столкновений с атомами газа и рассеяния на большие углы будет иметь нулевую скорость по направлению к подложке. Исчезает направленность движения распыленных частиц. В пространстве мишень – подложка создается градиент плотности распыленных частиц, вызывающий диффузию частиц по направлению к подложке. В этом случае процент распыленного материала  $\Pi$ , достигающего подложки, равен:

$$\Pi = \frac{M_3 \cdot \lambda}{M_2 \cdot D} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{D \cdot M_2}{M_3 \cdot \lambda} \right) \right] \cdot 100, \quad (3.7)$$

где  $D$  – расстояние мишень – подложка;

$\lambda$  – длина свободного пробега распыленных атомов;

$M_3$  – атомная масса атомов газа;

$M_2$  – атомная масса распыленных атомов.

Длина свободного пробега распыленных атомов с массой  $M_2$  и тепловой скоростью в газе, состоящем из атомов с массой  $M_3$ , с учетом того, что плотность распыленных атомов практически всегда существенно ниже плотности атомов газа, определяется соотношением:

$$\frac{1}{\lambda} = 8,34 \cdot 10^4 p \frac{(d_2 + d_3)^2}{4} \left( 1 + \frac{M_2}{M_3} \right)^{1/2}, \quad (3.8)$$

где  $p$  – давление газа;

$d_2$  и  $d_3$  – эффективные диаметры распыленных атомов и атомов газа соответственно.

Если скорость распыленных атомов больше тепловой, то диффузия имеет характер ускоренной диффузии.

Поскольку при столкновении с атомами газа распыленные частицы теряют энергию, то при высоких давлениях на этапе переноса может теряться одно из основных преимуществ ионно-плазменного нанесения – высокая энергия частиц, осаждающихся на подложке.

Перенос с минимальным рассеянием распыленных частиц безусловно обеспечивается при ионно-лучевом нанесении. Этап переноса оказывает минимальное влияние на характеристику процесса ионно-лучевого нанесения.

Условиями осаждения распыленного материала на подложку определяется, прежде всего, однородность получаемых пленок. Если распыляемую мишень изготовить в виде диска радиуса  $R_M$ , разместить параллельно ей на расстоянии  $R_{МП}$  плоскую подложку и зажечь между ними газовый разряд, то плотность потока напыляемых на подложку атомов  $I_{П}(r)$  будет изменяться по мере удаления от оси системы по закону

$$I_n(r) = \frac{I_M}{2} \left\{ 1 + \frac{R_M^2 - R_{mn}^2 - r^2}{\left[ (R_{mn}^2 + R_M^2 - r^2) + (2rR_{mn})^2 \right]^{1/2}} \right\}, \quad (3.9)$$

где  $I_M$  – плотность потока распыляемых с поверхности мишени атомов;

$r$  – расстояние по поверхности подложки от проекции центра дисковой мишени на плоскость осаждения (рис.3.2).

При выводе формулы (3.9) предполагалось, что плотность ионного потока по всей поверхности мишени одинакова, что распределение распыляемых частиц по углам вылета подчиняется закону косинуса (формула (3.4)) и что рассеяние атомов на пути от мишени к подложке не происходит.

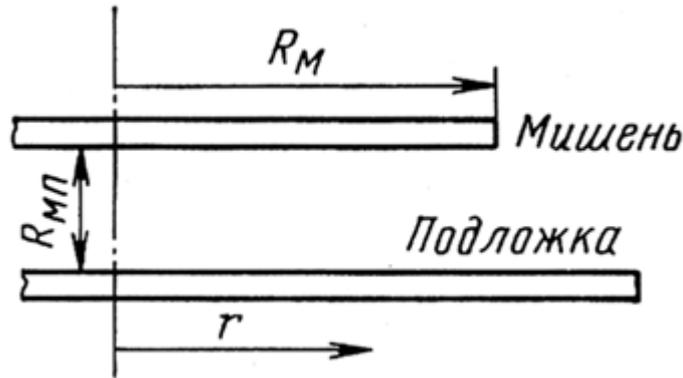


Рис.3.2. Взаимное расположение мишени и подложки при осаждении пленки в процессе ионно-плазменного распыления.

### 3.4. Осаждение материала на подложке

Осаждение материала на поверхности подложки происходит следующим образом. Когда частицы распыленного материала достигают поверхности подложки, то в результате соударения частиц с поверхностью происходит обмен энергией, вследствие чего частицы могут или упруго отразиться от поверхности, или адсорбироваться на ней. Критерием обмена энергией падающей частицы с подложкой служит коэффициент термической аккомодации  $\alpha_T$ . Случай полной термической аккомодации, при котором  $\alpha_T = 1$ , соответствует полному обмену энергии между падающей частицей и поверхностью, т.е. «прилипанию» частицы к поверхности и установлению равновесия. Количественно  $\alpha_T$  можно выразить через температуры или энергии падающих частиц ( $T_1, E_1$ ), адсорбированного слоя ( $T_a, E_a$ ) и поверхности ( $T_s, E_s$ ) в следующем виде:

$$\alpha_T = \frac{T_a - T_1}{T_s - T_1} = \frac{E_a - E_1}{E_s - E_1}. \quad (3.10)$$

Если  $T_a = T_s$  или  $E_a = E_s$ , то, разумеется,  $\alpha_T = 1$ . При  $T_s < T_a < T_1$  ( $E_s < E_a < E_1$ )  $\alpha_T < 1$ , что соответствует меньшей аккомодации.

Вероятность адсорбции обычно характеризуют коэффициентом конденсации (*коэффициентом прилипания*), равным отношению числа адсорбированных частиц к числу частиц падающих на поверхность. Число адсорбированных единичных атомов  $N_a$  связано с потоком атомов на поверхность  $J_1$  следующим выражением:

$$N_a(t) = J_1 \cdot \tau_s \cdot \left[ 1 - \exp\left(-t/\tau_s\right) \right], \quad (3.11)$$

где  $t$  – время осаждения;

$\tau_s$  - время жизни адсорбированного атома на поверхности.

Время жизни адсорбированного атома (*адатома*) на поверхности после установления термического равновесия может быть определено по формуле:

$$\tau_a = \nu_a^{-1} \cdot \exp\left(\frac{E_d}{kT}\right) \quad (3.12)$$

где  $\nu_a$  – частота колебаний адсорбированного атома по нормали к поверхности;

$E_d$  – энергия десорбции.

Адатома могут либо десорбироваться, либо диффундировать по поверхности, перескакивая на соседние активные центры. Среднее расстояние, на которое перемещается диффундирующий адатом за время  $t$  равно:

$$\langle x^2 \rangle = 2 \cdot D_a \cdot t, \quad D_a = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_D}{kT}\right), \quad (3.13)$$

где  $D_a$  – коэффициент диффузии адатомов;

$E_D$  – энергия активации диффузии адатомов;

$D_0$  – предэкспоненциальный фактор.

Соударения атомов, мигрирующих в адсорбционном слое, приводят к образованию ассоциаций атомов (*кластеров*). На начальной стадии рост таких кластеров сопровождается увеличением свободной энергии, т.е. протекает с преодолением активационного барьера. По достижении некоторого критического размера кластера возникает кристаллический зародыш. Зародышем называют минимальное количество новой фазы, способной к самостоятельному существованию и находящейся в равновесии с пересыщенной исходной фазой. Рост зародыша сопровождается убыванием свободной энергии. При появлении зародыша метастабильная фаза начинает переходить в стабильную. Такой переход является самопроизвольным поскольку сопровождается уменьшением свободной энергии. Различные дефекты подложки могут инициировать процесс зародышеобразования, уменьшая высоту активационного барьера.

Режимы роста тонких пленок обычно разделяются на послойный, островковый и промежуточный.

Послойный режим реализуется в том случае, если атомы осаждаемого вещества связаны с подложкой более сильно, чем друг с другом. Моноатомные слои заполняются в этом режиме по очереди, т.е. двумерные зародыши (толщиной в один атом) следующего слоя образуются на верхней части зародышей предыдущего слоя после его заполнения.

Островковый режим реализуется в противоположном случае, когда атомы осаждаемого вещества связаны между собой сильнее, чем с подложкой. В островковом режиме маленькие зародыши образуются прямо на поверхности подложки и затем растут, превращаясь в большие островки конденсированной фазы. Затем сливаясь, эти островки образуют после заполнения каналов между ними сплошную пленку.

В промежуточном режиме вначале реализуется послойный рост, затем, после заполнения одного-двух слоев, начинается островковый режим роста.

Важной особенностью процесса конденсации при ионно-плазменном осаждении является внедрение осаждаемых атомов в глубь подложки. Глубину (число атомных слоев  $n$ ), на которую проникает падающий на подложку атом, можно приближенно определить по формуле:

$$n = 1 + \sqrt{\frac{\ln(E_{cp}/E_c)}{\ln 2}}, \quad (3.14)$$

где  $E_{cp}$  – средняя энергия смещенного при бомбардировке атома подложки;

$E_c$  - энергия сублимации.

Величина  $E_{cp}$  при малых энергиях бомбардирующих атомов определяется формулой:

$$E_{cp} = \frac{1}{2}(E_{max} + E_{min}), \quad (3.15)$$

где  $E_{max}$  – максимальная энергия, которая может быть передана бомбардирующим атомом неподвижному атому подложки;

$E_{min}$  – минимальная энергия, требуемая для смещения атома подложки из узла кристаллической решетки.

В свою очередь  $E_{max}$  определяется формулой

$$E_{max} = \frac{4M_1 \cdot M_2}{(M_1 + M_2)^2} \cdot E_1, \quad (3.16)$$

где  $M_1$  и  $M_2$  – массы бомбардирующего атома и атома подложки соответственно;

$E_1$  – энергия бомбардирующего атома.

К сожалению четкого понимания всех явлений, определяющих формирование пленок при ионно-плазменном распылении, пока нет, поскольку зарождение и рост этих пленок происходит в значительно более сложных условиях, чем пленок, получаемых методом вакуумного термического испарения. Более высокая энергия распыленных частиц по сравнению с испаренными, бомбардировка подложки и растущей пленки

ионами, возбужденными нейтральными частицами, электронами, а также воздействие излучения плазмы существенно влияют на кинетику зародышеобразования и механизм роста пленки. Экспериментально установлено, что в отличие от вакуумного термического испарения, в случае ионно-плазменного распыления не существует критической температуры подложки и критической плотности потока атомов, поступающего на подложку, необходимых для зарождения и роста пленки. Практически при любых плотностях потока распыленных атомов и в широком диапазоне температур осаждаются монокристаллические пленки материалов.

### **3.5. Загрязнение пленок материалов, полученных ионно-плазменным нанесением**

В процессах ионно-плазменного нанесения ионная бомбардировка активирует поверхность растущей пленки. Высокая активность поверхности способствует эффективному поглощению примесей из газовой фазы, что приводит к загрязнению пленки.

Относительное число загрязняющих примесей  $f_{\Pi}$  в составе конденсирующейся пленки при отсутствии бомбардировки ее ионами может быть определено из выражения

$$f_{\Pi} = \frac{\alpha_{\Pi} \cdot J_{\Pi}}{\alpha_{\Pi} \cdot J_{\Pi} + J_a}, \quad (3.17)$$

где  $\alpha_{\Pi}$  – эффективный коэффициент прилипания примеси к растущей пленке;

$J_a$  – поток атомов конденсирующегося материала на поверхность подложки;

$J_{\Pi}$  – поток атомов загрязняющей примеси на поверхность.

Уменьшить число загрязняющих примесей можно если повысить температуру подложки (уменьшается коэффициент  $\alpha_{\Pi}$  вследствие усиления десорбции примеси); снизить парциальное давление примесного газа (уменьшается поток  $J_{\Pi}$ ); увеличить поток атомов конденсирующегося материала  $J_a$ .

При ионно-плазменном нанесении коэффициент  $\alpha_{\Pi}$  будет существенно выше, чем при вакуумном термическом испарении, так как в результате возбуждения, диссоциации и ионизации в газоразрядной плазме атомы и молекулы остаточных газов поступают на активную поверхность растущей пленки в виде энергетических частиц. С другой стороны, сопутствующая конденсации ионная бомбардировка может способствовать снижению концентрации захваченных в пленке остаточных газов в результате их распыления. Относительное число загрязняющих примесей в пленке в этом случае может быть оценено соотношением:

$$f_g = \frac{\alpha_{\dot{I}} \cdot J_{\dot{I}} - Y_{\dot{I}} \cdot J_i}{\left(\alpha_{\dot{I}} \cdot J_{\dot{I}} + J_a\right) - J_i \cdot \left(Y_{\dot{I}} - Y_a\right)}, \quad (3.18)$$

где  $J_i$  – поток ионов, поступающий на поверхность растущей пленки;  
 $Y_{\dot{I}}$  - коэффициент распыления примеси;  
 $Y_a$  - коэффициент распыления материала пленки.

В осаждаемых пленках в значительно большем числе захватываются атомы не остаточных газов, а атомы рабочего газа, поскольку его давление намного больше давления остаточных газов. Вероятность удержания инертного газа в пленке мала, так как он не вступает в химическое взаимодействие с материалом пленки. Поэтому вероятность удержания зависит от глубины внедрения атома инертного газа в пленку, т.е. от его кинетической энергии.

Исходя из характеристик процесса ионно-плазменного нанесения, можно оценить относительную концентрацию захваченного в пленке инертного газа. Скорость захвата инертного газа на единице площади поверхности пленки пропорциональна потоку ионов инертного газа и может быть оценена соотношением:

$$V_c = J_i \cdot \sigma_c \cdot (n_0 - n), \quad (3.19)$$

где  $\sigma_c$  – поперечное сечение захвата атома инертного газа;  
 $n_0$  и  $n$  – число свободных и занятых центров захвата на единице площади поверхности пленки.

Число центров захвата определяется прежде всего структурой пленки. Большое число центров захвата имеется в аморфных и поликристаллических пленках, в монокристаллических пленках при отсутствии дислокаций их относительно мало.

Захваченный (адсорбированный) газ может быть десорбирован двумя способами: распылением и десорбцией. Скорость распыления захваченного газа в результате ионной бомбардировки определяется выражением:

$$V_p = J_i \cdot \sigma_p \cdot n, \quad (3.20)$$

где  $\sigma_p$  – поперечное сечение распыления.

Скорость термической десорбции зависит от прочности связи атома инертного газа в центре захвата и может быть оценена по формуле:

$$V_d = n / \tau_S, \quad (3.21)$$

где  $\tau_S$  - время жизни адсорбированного атома инертного газа на поверхности.

В процессе нанесения пленки адсорбированный газ постоянно замуровывается в растущей пленке. Скорость замуровывания

$$V_C = V_I \cdot \sigma_C \cdot n, \quad (3.22)$$

где  $V_H$  - скорость роста пленки;

$\sigma_3$  - поперечное сечение замуровывания.

Через некоторое время после начала процесса нанесения захват и десорбция приходят в равновесие, которое отражает соотношение

$$J_i \cdot \sigma_c \cdot (n_0 - n) = J_i \cdot \sigma_p \cdot n + V_H \cdot \sigma_C \cdot n + \frac{n}{\tau_S}. \quad (3.23)$$

### **3.6. Ионное осаждение материалов**

Ионным осаждением называется процесс, в котором осаждение материала сопровождается бомбардировкой ионами инертного газа или ионами осаждаемого материала. Таким образом, на поверхности подложки протекают два противоположно направленных процесса: осаждение пленки материала и бомбардировка ее ионами.

В результате ионной бомбардировки происходит распыление и активация поверхности подложки и осаждаемой пленки, что повышает плотность центров конденсации частиц осаждаемого материала, т.е. ионная бомбардировка влияет на процесс зародышеобразования и кинетику роста пленки. Кроме того, при ионной бомбардировке происходит разогрев подложки и осаждаемой пленки. Распыление и разогрев способствуют увеличению десорбции загрязняющих пленку атомов и молекул газа.

Ионно-плазменное нанесение с ионной бомбардировкой подложки обеспечивается подачей на нее отрицательного электрического потенциала (до 200 – 300 В). Ионная бомбардировка может производиться до начала, во время и после окончания процесса нанесения. Различают два способа ионного осаждения материала. Первый, когда материал и бомбардирующие ионы поступают на подложку одновременно – так называемый постоянный режим ионного осаждения. Второй, когда потоки ионов и материала или, по крайней мере, один из них поступают на подложку периодически – чередующийся режим ионного осаждения. Свойства пленок, получаемых в обоих видах ионного осаждения, практически не отличаются. В то же время чередующийся режим позволяет получать большие скорости осаждения на больших по размеру поверхностях подложек, т.е. этот режим обеспечивает большую производительность.

Основными параметрами, характеризующими процесс ионного осаждения, являются энергия ионов и отношение  $J_i / J_a$ , где  $J_i$  и  $J_a$  – потоки ионов и атомов на поверхности подложки. Энергетика процесса конденсации материала, следовательно, кинетика роста пленки может регулироваться в широких пределах изменением отношения  $J_i / J_a$  и энергии ионов.

#### **4. Описание программного обеспечения для расчета параметров процесса ионно-плазменного нанесения тонкопленочного покрытия на подложку**

Программное обеспечение для расчета параметров процесса ионно-плазменного нанесения тонкопленочных покрытий в технологии микроэлектроники разработано доцентом кафедры ФОЭТ Черновым А.А. для компьютеров типа IBM PC и написано на алгоритмическом языке “Visual Basic”.

Программа позволяет производить расчеты основных геометрических параметров системы распыления для процесса ионно-плазменного нанесения. Программа позволяет рассчитать основные параметры процесса, такие как:

- расстояние от мишени до пластины –  $R_{мп}$  ;
- диаметр мишени –  $D_m$ ;
- отношение плотностей потоков на поверхность пластины и от поверхности мишени –  $I_p/I_m$ ;
- относительную толщину тонкопленочного покрытия на пластине –  $X/X_0$ ;

в зависимости от заданных исходных данных. При этом исходными данными для проведения расчета являются:

- расстояние от мишени до пластины –  $R_{мп}$ ,
- диаметр пластины –  $D_p$ ,
- диаметр мишени –  $D_m$ ,
- расстояние от центра пластины до заданной точки –  $R$ ,
- отношение плотностей потоков на поверхность пластины и от поверхности мишени –  $I_p/I_m$ ,
- относительную толщину тонкопленочного покрытия на пластине –  $X/X_0$ .

При запуске программы пользователю предоставляется интерфейс программы, представленный на рис. 4.1.

Пользователь имеет возможность выбрать в рамке «Выбор параметров» один из четырех возможных расчетных параметров процесса ионно-плазменного распыления:

- расстояние от мишени до пластины –  $R_{мп}$  ;
- диаметр мишени –  $D_m$ ;
- отношение плотностей потоков на поверхность пластины и от поверхности мишени –  $I_p/I_m$ ;
- относительную толщину тонкопленочного покрытия на пластине –  $X/X_0$ .

Далее пользователь может выбрать один из трех возможных режимов работы программы:

1. Циклический режим расчета.

2. Табличный режим расчета.
3. Графический режим расчета.



Рис.4.1. Интерфейс программы расчета параметров процесса ионно-плазменного распыления при запуске программы.

В циклическом режиме расчета пользователь имеет возможность многократно вычислять значение выбранного расчетного параметра, изменяя значения исходных данных.

В табличном режиме расчета на экран выводится таблица значений выбранного расчетного параметра в заданном пользователем диапазоне значений одного из параметров процесса ионно-плазменного распыления. Например, могут быть рассчитаны таблицы зависимостей: расстояния от мишени до пластины –  $R_{мп}$  от отношения плотностей потоков на поверхность пластины и от поверхности мишени –  $I_{п}/I_{м}$ , то есть функция  $R_{мп} = f(I_{п}/I_{м})$ , или значения диаметра мишени –  $D_{м}$  от отношения плотностей потоков на поверхность пластины и от поверхности мишени –  $I_{п}/I_{м}$ , то есть функция  $D_{м} = f(I_{п}/I_{м})$ , или отношения плотностей потоков на поверхность пластины и от поверхности мишени –  $I_{п}/I_{м}$  от расстояния от центра пластины до заданной точки –  $R$ , то есть функция  $I_{п}/I_{м} = f(R)$ , или относительной толщины тонкопленочного покрытия на пластине –  $X/X_{о}$  от

расстояния от центра пластины до заданной точки –  $R$ , то есть функция  $X/X_0 = f(R)$ , в заданном пользователе диапазоне изменения аргумента.

В графическом режиме расчета на экран выводятся графики зависимостей выбранного расчетного параметра от одного из параметров процесса ионно-плазменного распыления в заданном пользователем диапазоне значений аргумента. При этом, на экран дисплея могут быть выведены несколько графиков выбранной зависимости при различных значениях варьируемых пользователем параметрах процесса. После выбора режима расчета пользователю необходимо нажать на кнопку «Расчет параметров процесса ионно-плазменного распыления».

Во всех режимах работы программы при вводе пользователем значений параметров за пределами их допустимых значений на экран дисплея выдаются соответствующие комментарии. При этом в случае выхода значения расчетного параметра за предел допустимых значений по физическим или технологическим критериям оно отображается в поле вывода, в таблице или на графике красным цветом. Для сокращения времени ввода значений исходных данных в программе по умолчанию данным присваивается заданные в программе значения, а при изменении их пользователем - сохраняются текущие значения параметров. В любом режиме работы программы предусмотрены возможность изменения расчетного параметра и выход в основное меню.

В любом режиме расчета поля ввода исходных данных пользователем окрашены в зеленый цвет, а поля вывода расчетных данных окрашены в голубой цвет.

Интерфейс программы в циклическом режиме расчета представлен на рис.4.2. В циклическом режиме расчета пользователь имеет возможность изменять введенные значения исходных параметров и расчетный параметр.

Пример расчета значения расстояния от мишени до пластины –  $R_{мп}$ , а также значения относительной толщины тонкопленочного покрытия на пластине –  $X/X_0$  при заданных пользователем исходных данных: диаметре пластины на подложкодержателе –  $D_{п} = 250$  мм, диаметре мишени –  $D_{м} = 250$  мм, расстоянии от центра пластины до заданной точки  $R = 125$  мм, то есть на краю пластины, и отношении плотностей потоков на поверхность пластины и от поверхности мишени –  $I_{п}/I_{м} = 0.4$ , представлен на рис.4.2. Как видно из результатов расчетов, при проведении процесса ионно-плазменного распыления при указанных выше значениях параметров процесса расстояние от мишени до пластины –  $R_{мп}$  составляет 50.5 мм, а относительная толщина тонкопленочного покрытия на пластине –  $X/X_0$  составляет 0.4665. При изменении исходных данных пользователем расчетные значения параметров, соответствующие предыдущим исходным данным удаляются, и для получения новых расчетных значений необходимо нажать на кнопку «Расчет параметров процесса ионно-

плазменного распыления». Для выхода в основное меню программы необходимо нажать на кнопку «Выход».



Рис.4.2. Интерфейс программы расчета параметров процесса ионно-плазменного распыления в циклическом режиме работы при расчете значения расстояния от мишени до пластины  $R_{мп}$ .

Пример расчета отношения плотностей потоков на поверхность пластины и от поверхности мишени –  $I_p/I_m$ , а так же относительной толщины тонкопленочного покрытия на пластине –  $X/X_o$  при заданных пользователем исходных данных: расстоянием между источником и пластиной  $R_{мп} = 50$  мм, диаметре пластины на подложкодержателе –  $D_p = 200$  мм, диаметре мишени –  $D_m = 300$  мм, расстоянии от центра пластины до заданной точки  $R = 100$  мм, то есть на краю пластины, представлен на рис.4.3.

Как видно из результатов расчетов при проведении процесса ионной ионно-плазменного распыления при указанных выше значениях параметров процесса отношение плотностей потоков на поверхность пластины и от поверхности мишени –  $I_p/I_m = 0.77735$ , а относительная толщина тонкопленочного покрытия на пластине –  $X/X_o = 0.8837$ .

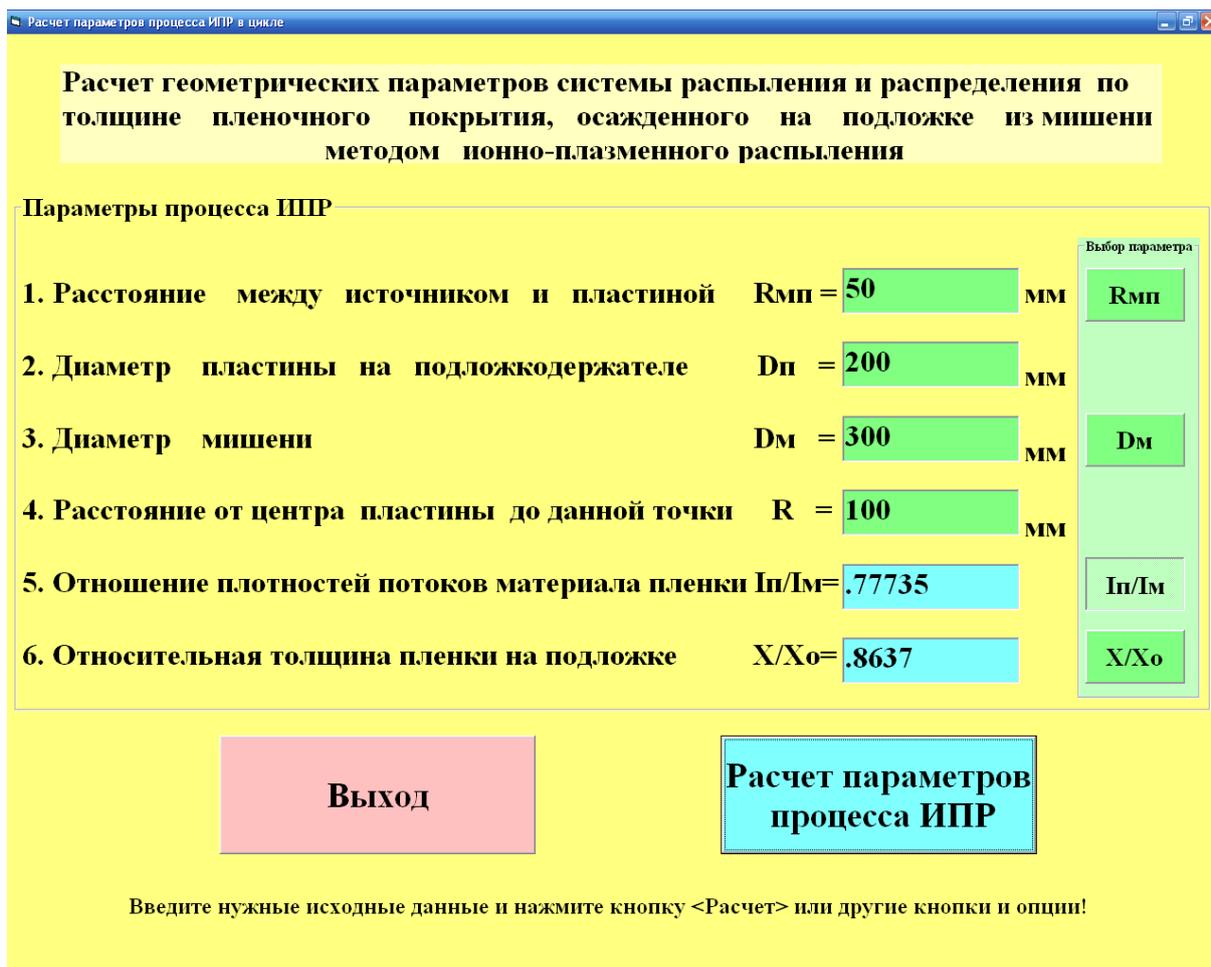


Рис.4.3. Интерфейс программы расчета параметров процесса ионно-плазменного распыления в циклическом режиме работы при расчете значений  $I_p/I_m$  и  $X/X_o$ .

В табличном режиме расчета пользователь также имеет возможность корректировать введенные значения параметров и изменять режим работы программы. Пример выбора и ввода значений исходных данных, а также результаты расчетов значений диаметра мишени –  $D_m$  процесса ионно-плазменного распыления в выбранном пользователем диапазоне значений отношения плотностей потоков на поверхность пластины и от поверхности мишени –  $I_p/I_m$  от 0.05 до 0.6 при расстоянии между источником и пластиной  $R_{мп} = 100$  мм, диаметре пластины на подложкодержателе –  $D_p = 250$  мм и расстоянии от центра пластины до заданной точки  $R = 125$  мм, то есть на краю пластины, в табличном режиме расчета представлены на рис.4.4.

Как видно из результатов расчетов при проведении процесса ионно-плазменного распыления при указанных выше значениях параметров процесса диаметр мишени –  $D_m$  изменяется от 109.6 мм до 363.6 мм соответственно.

Расчет параметров процесса ИПР в табличном режиме

**Расчет геометрических параметров системы испарения и распределения по толщине пленочного покрытия, осажденного на подложке из мишени методом ионно-плазменного распыления**

**Параметры процесса ИПР**

1. Расстояние между мишенью и пластиной  $R_{мп} = 100$  мм

2. Диаметр пластины на подложкодержателе  $D_{п} = 250$  мм

3. Диаметр мишени  $D_{м} = \text{Табл } f(I_{п}/I_{м})$  мм

4. Расстояние от центра пластины до данной точки  $R = 125$  мм

5. Отношение плотностей потоков материала пленки  $I_{п}/I_{м} = .05-.9999$

6. Относительная толщина пленки на подложке  $X/X_0 =$

$I_{п}/I_{м\min} = 0.05$        $I_{п}/I_{м\max} = 0.6$            

**Таблица расчетных значений параметров процесса ИПР**

$I_{п}/I_{м}$	.05	.1188	.1875	.2563	.325	.3938	.4625	.5313	.6
$D_{м}$ (мм)	109.6	161.9	197.8	227.4	254.	279.6	305.5	332.9	363.6

Введите нужные исходные данные и нажмите кнопку <Расчет> или другие кнопки и опции!

Рис.4.4. Интерфейс программы расчета параметров процесса ионно-плазменного распыления в табличном режиме работы при расчете значения диаметра мишени –  $D_{м}$ .

Пример выбора и ввода значений исходных данных, а также результаты расчетов значений относительной толщины тонкопленочного покрытия на пластине –  $X/X_0$  при проведении процесса ионно-плазменного распыления в выбранном пользователем диапазоне значений расстояния от центра пластины до заданной точки  $R$  от 0 до 125 мм, то есть от центра до края пластины, при расстоянии между источником и пластиной  $R_{мп} = 100$  мм, диаметре пластины на подложкодержателе –  $D_{п} = 250$  мм и диаметре мишени  $D_{м} = 350$  мм, в табличном режиме расчета представлены на рис.4.5.

Как видно из результатов расчетов при проведении процесса ионно-плазменного распыления при указанных выше значениях параметров процесса относительная толщина тонкопленочного покрытия на пластине –  $X/X_0$  изменяется от 1 до 0.7571 соответственно.

Расчет параметров процесса ИПП в табличном режиме

**Расчет геометрических параметров системы испарения и распределения по толщине пленочного покрытия, осажденного на подложке из мишени методом ионно-плазменного распыления**

**Параметры процесса ИПП**

1. Расстояние между мишенью и пластиной	$R_{мп} =$	<input type="text" value="100"/>	ММ	<input type="button" value="Rмп"/>
2. Диаметр пластины на подложкодержателе	$D_{п} =$	<input type="text" value="250"/>	ММ	
3. Диаметр мишени	$D_{м} =$	<input type="text" value="350"/>	ММ	<input type="button" value="Dм"/>
4. Расстояние от центра пластины до данной точки	$R =$	<input type="text" value="0-Dп/2"/>	ММ	
5. Отношение плотностей потоков материала пленки $I_{п}/I_{м}$		<input type="text"/>		<input type="button" value="Iп/Iм"/>
6. Относительная толщина пленки на подложке	$X/X_0 =$	<input type="text" value="Табл f(R)"/>		<input type="button" value="X/X_0"/>

$R_{min}(ММ) =$         $R_{max}(ММ) =$

**Таблица расчетных значений параметров процесса ИПП**

R(ММ)	.	15.6	31.3	46.9	62.5	78.1	93.8	109.4	125.
X/X <sub>0</sub>	1.	.997	.9879	.9723	.9492	.9174	.8757	.8226	.7571

Введите нужные исходные данные и нажмите кнопку <Расчет> или другие кнопки и опции!

Рис.4.5. Интерфейс программы расчета параметров процесса ионно-плазменного распыления в табличном режиме работы при расчете значения относительной толщины тонкопленочного покрытия на пластине –  $X/X_0$ .

В графическом режиме расчета на экран выводятся графики зависимостей выбранного расчетного параметра в заданном пользователем диапазоне значений одного из параметров процесса ионно-плазменного распыления. Например, могут быть выведены на экран дисплея графики зависимостей:

1. Расстояния от мишени до пластины –  $R_{мп}$  от отношения плотностей потоков на поверхность пластины и от поверхности мишени –  $I_{п}/I_{м}$ , то есть функция  $R_{мп} = f(I_{п}/I_{м})$ .

2. Отношения плотностей потоков на поверхность пластины и от поверхности мишени –  $I_{п}/I_{м}$  от диаметр мишени –  $D_{м}$ , то есть функция  $I_{п}/I_{м} = f(D_{м})$ .

3. Отношения плотностей потоков на поверхность пластины и от поверхности мишени –  $I_{п}/I_{м}$  от расстояния от центра пластины до заданной точки  $R$ , то есть функция  $I_{п}/I_{м} = f(R)$ .

4. Отношения плотностей потоков на поверхность пластины и от поверхности мишени –  $I_{п}/I_{м}$  от расстояния от мишени до пластины –  $R_{мп}$ , то есть функция  $I_{п}/I_{м} = f(R_{мп})$ .

5. Относительной толщины тонкопленочного покрытия на пластине –  $X/X_0$  от расстояния от центра пластины до заданной точки  $R$ , то есть функция  $X/X_0 = f(R)$ .

Интерфейс программы в графическом режиме расчета представлен на рис.4.6. В графическом режиме расчета пользователь имеет возможность изменять введенные значения исходных параметров и расчетный параметр.

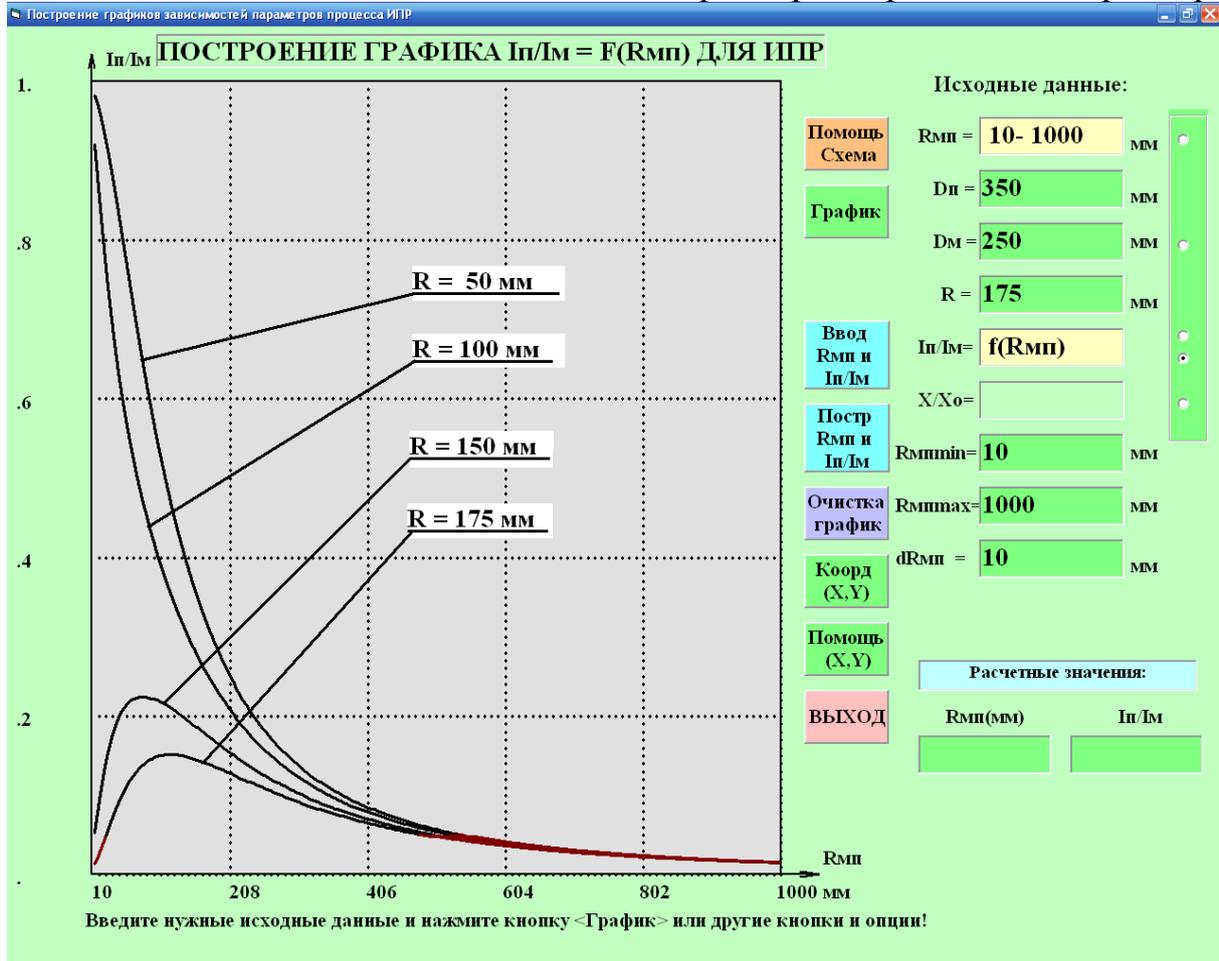


Рис.4.6. Интерфейс программы расчета параметров процесса ионно-плазменного распыления в графическом режиме работы при построении графиков зависимостей  $I_p/I_m = f(R_{mp})$ .

В графическом режиме работы путем варьирования исходных данных пользователь имеет возможность вывести на экран дисплея несколько графиков выбранной функциональной зависимости. На рис.4.6 в качестве расчетного параметра выбрано расстояние от мишени до пластины –  $R_{mp}$ . На рисунке представлены четыре графика зависимости отношения плотностей потоков на поверхность пластины и от поверхности мишени –  $I_p/I_m$  от расстояния от мишени до пластины –  $R_{mp}$ , то есть функция  $I_p/I_m = f(R_{mp})$ , для значений расстояния от мишени до пластины –  $R_{mp}$  равных 50 мм, 100 мм, 150 мм и 175 мм соответственно.

Интерфейс программы позволяет пользователю, вводить значения диаметра пластины -  $D_p$ , диаметра мишени –  $D_m$ , расстояния от центра

пластины до заданной точки –  $R$ , задавать диапазон изменения значений от расстояния от мишени до пластины –  $R_{мп}$ , то есть значения –  $R_{мпmin}$  и –  $R_{мпmax}$  в мм, которые фактически определяют масштаб построения графиков по осям координат, а так же вводить значение дискретного изменения величины расстояния от мишени до пластины –  $dR_{мп}$  в мм при режиме построения графика выбранной зависимости «По точкам». При обнаружении ошибки в процессе ввода пользователем значений параметров процесса программа выводит на экран внизу формы соответствующие комментарии, указывающие на характер ошибки.

При нажатии пользователем на кнопку <Помощь-Схема> на экран дисплея выводится схема проведения процесса ионно-плазменного распыления. При повторном нажатии пользователем на кнопку <Помощь-Схема> или при щелчке кнопкой мыши на поле схемы ее изображение сворачивается с экрана дисплея.

При нажатии пользователем на кнопку <График> на экран дисплея выводится рамка с двумя опциями, позволяющими пользователю выбрать режим построения графиков:

- Все точки
- По точкам.

При выборе режима построения - «По точкам» на экран выводится кнопка <Продолжить построение графика> и точка на поле графика соответствующая расчетным значениям аргумента –  $R_{мп} = 20$  мм и функции  $I_{п}/I_{м} = 0.9654$  в поля в нижней правой части формы. При каждом нажатии пользователем на кнопку <Продолжить построение графика> происходит увеличение текущего значения аргумента на шаг  $dR_{мп}$ , расчет значения функции  $I_{п}/I_{м}$ , вывод этих значений в указанных полях формы и отображение текущей точки на поле графика. Это позволяет пользователю определить значения  $R_{мп}$  и  $I_{п}/I_{м} = f(R_{мп})$  для любой точки графика. Процесс построения графика продолжается до тех пор, пока значение аргумента не достигнет максимального введенного пользователем значения, после чего построение графика прекращается и изображение кнопки <Продолжить построение графика> исчезает. При нажатии пользователем кнопки <Стоп> режим построения графика в режиме «По точкам» завершается.

При выборе режима построения - «Все точки» на экран выводится график выбранной пользователем зависимости  $I_{п}/I_{м} = f(R_{мп})$ .

При нажатии пользователем на кнопку <Ввод  $R_{мп}$  и  $I_{п}/I_{м}$ > ему предоставляется возможность ввести числовые значения  $R_{мп}$  и  $I_{п}/I_{м}$  в указанных полях формы и при нажатии на кнопку <Построение  $R_{мп}$  и  $I_{п}/I_{м}$ > вывести на поле графика точку с данными координатами.

При нажатии пользователем на кнопку <Очистка экрана> все отображаемые на поле графика зависимости удаляются без изменения

масштаба изображения и сетки, при этом введенные пользователем последние значения параметров процесса сохраняются.

При нажатии пользователем на кнопку <Координаты (X,Y)> цвет кнопки изменяется на красный и устанавливается режим работы, позволяющий при перемещении указателя мыши в пределах поля графика в любой точке считывать координаты этой точки. Значения координат, то есть в данном случае значения  $R_{mp}$  и  $I_p/I_m$ , отображаются в соответствующих полях справа внизу формы. При повторном нажатии пользователем на кнопку <Координаты (X,Y)> цвет кнопки изменяется на исходный зеленый и устанавливается исходный режим работы мыши.

При каждом новом вводе пользователем значений диапазона изменения аргумента – в данном случае значений  $R_{mpmin}$  и  $R_{mpmax}$ , то есть при изменении масштаба изображения графика, происходит удаление отображаемых графиков и автоматический перерасчет масштаба отображения графиков по осям координат. При этом введенные значения аргумента автоматически нормируются под заданную в программе масштабную сетку по оси абсцисс - X. Масштаб изображения графика по оси ординат - Y рассчитывается автоматически, исходя из введенных пользователем последний раз исходных данных для параметров процесса ионно-плазменного распыления и заданной в программе масштабной сетке по оси абсцисс - X. Следует отметить, что при изменении значений  $R_{mpmin}$  и  $R_{mpmax}$  автоматически пересчитывается масштаб отображения графиков по оси ординат для текущих значений параметров процесса ионно-плазменного распыления. То есть, если пользователю требуется отобразить на экране несколько графиков выбранной зависимости, то сначала необходимо ввести в качестве исходных параметров процесса такие значения, которые соответствуют максимальным значениям величины  $I_p/I_m$ , а затем ввести требуемые значения  $R_{mpmin}$  и  $R_{mpmax}$  для пересчета масштаба отображения графиков.

При нажатии пользователем на кнопку <Помощь (X,Y)> на экран дисплея в нижней части формы отображается информация для пользователя о действиях с кнопками мыши. Так при нажатой кнопке <Координаты (X,Y)> (цвет кнопки изменяется на красный и устанавливается режим работы, позволяющий при размещении указателя мыши на поле графика в любой точке считывать координаты этой точки), нажатие левой кнопки мыши приводит к отображению точки на поле графика в месте расположения курсора мыши, а нажатие правой кнопки мыши приводит к стиранию точки на поле графика в месте расположения курсора мыши. Двойной щелчок левой кнопкой мыши на поле графика приводит к тому, что все отображаемые на поле графика зависимости удаляются без изменения масштаба изображения и сетки, при этом введенные пользователем последние значения параметров процесса сохраняются.

При нажатии пользователем на кнопку <Выход> на экране дисплея отображается основное меню программы.

При нажатии пользователем опции, которая определяет расчетный параметр, на экране отображается соответствующий интерфейс программы. Так при выборе опции – Rмп в графическом режиме работы интерфейс программы представлен на рис.4.7.

На рис.4.7 в качестве расчетного параметра выбрана функция зависимости  $R_{мп} = f(I_{п}/I_{м})$ . На рисунке представлены четыре графика зависимости величины Rмп для значений расстояния от центра пластины до заданной точки – R равных 50, 100, 150 и 175 мм соответственно.

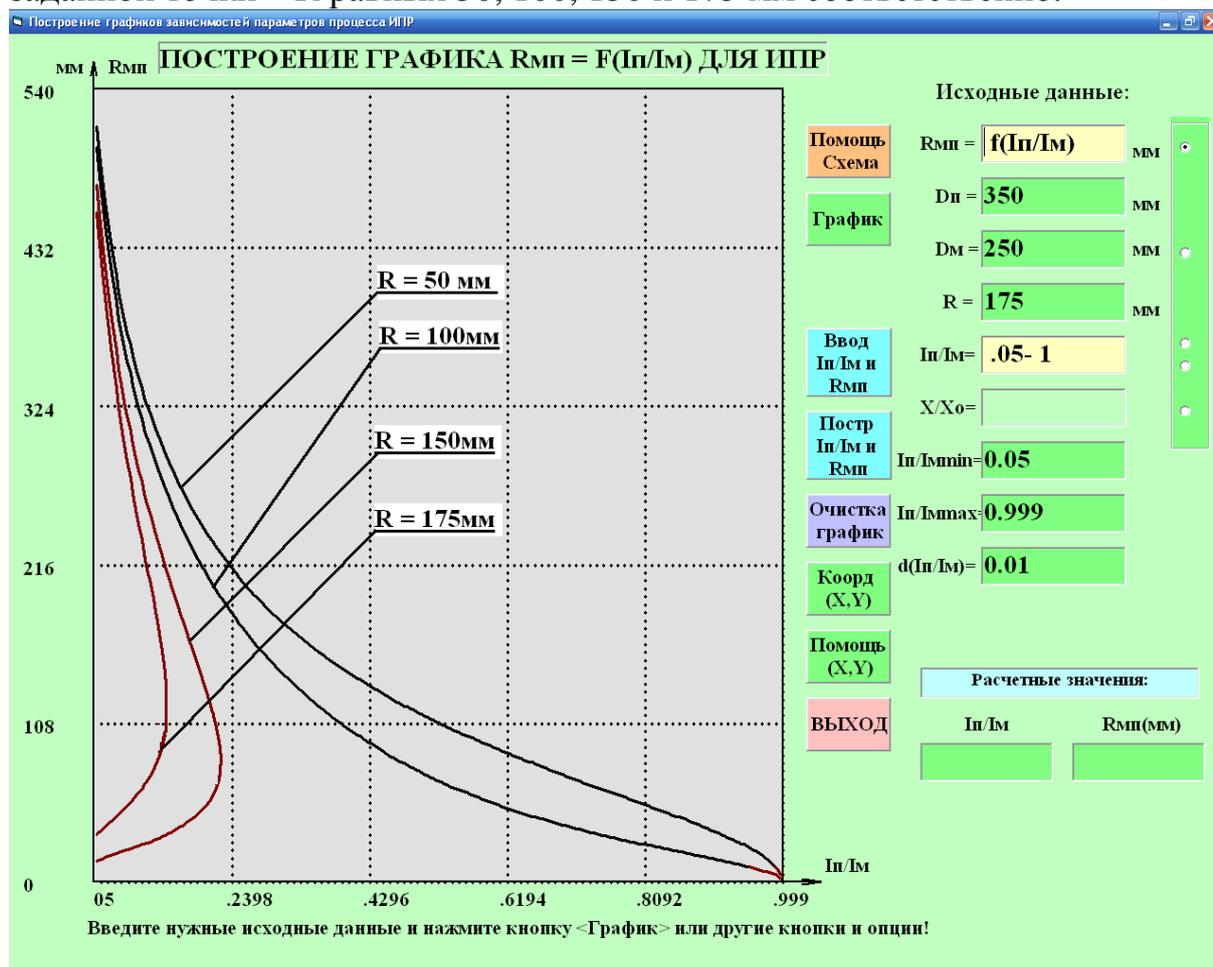


Рис.4.7. Интерфейс программы расчета параметров процесса ионно-плазменного распыления в графическом режиме работы при построении графиков зависимостей  $R_{мп} = f(I_{п}/I_{м})$ .

Интерфейс программы в этом случае аналогичен рассмотренному нами выше случаю.

На рис.4.8 представлены графики зависимости  $I_{п}/I_{м} = f(D_{м})$ . Для трех значений расстояния от мишени до пластины Rмп равных 50, 100 и 150 мм соответственно, диаметре пластины Dп = 250 мм, расстоянии от центра пластины R = 125 мм и изменении диаметра мишени Dм в диапазоне от 50 до 400 мм.

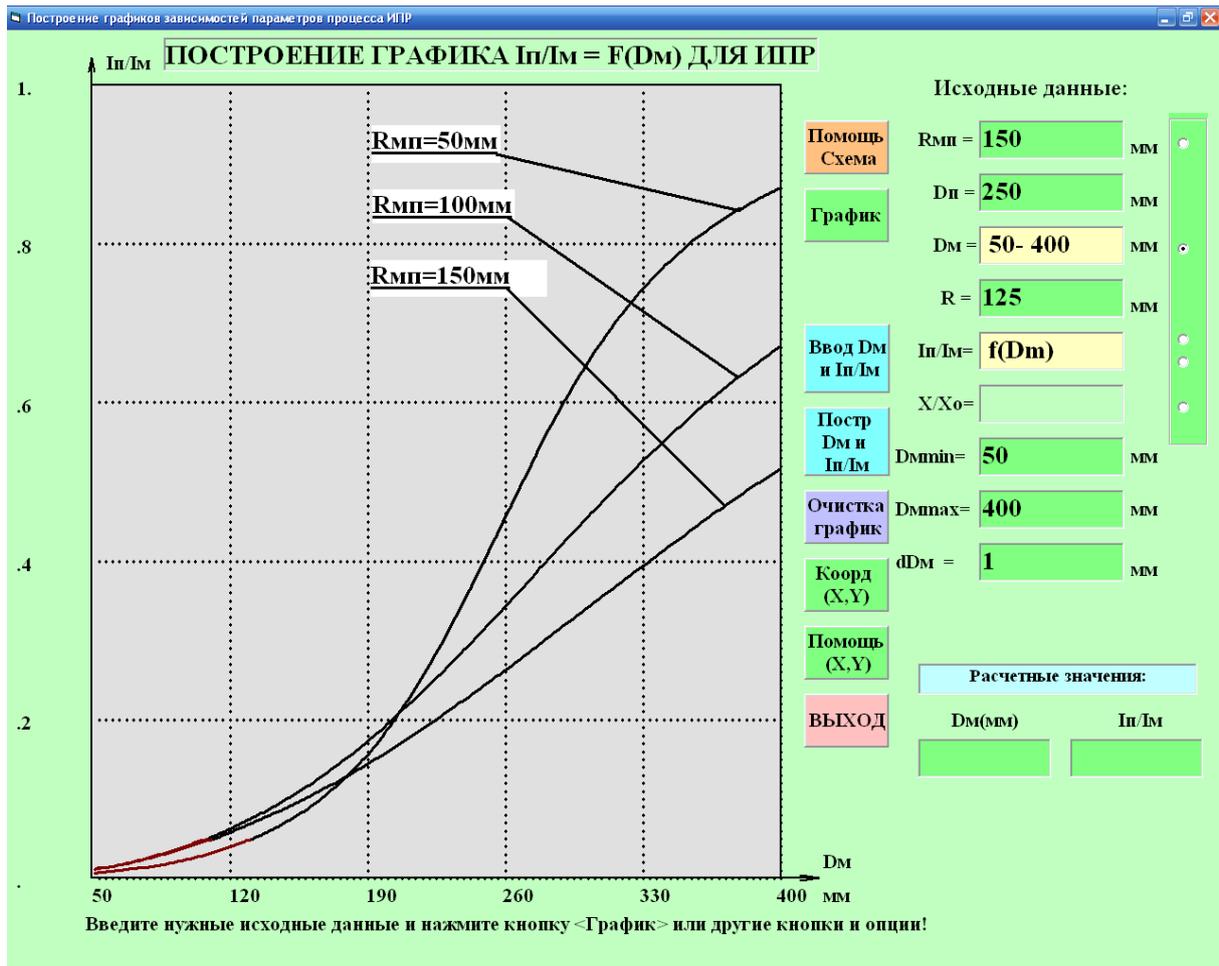


Рис.4.8. Интерфейс программы расчета параметров процесса ионно-плазменного распыления при построении графиков зависимости  $I_p/I_m = f(D_m)$  для трех значений  $R_{мп}$ .

На рис.4.9 представлены три графика зависимости отношения плотностей потоков на поверхность пластины и от поверхности мишени –  $I_p/I_m$  от расстояния от центра пластины –  $R$  в диапазоне от 0 до 175 мм, то есть функция  $I_p/I_m = f(R)$ , для значений расстояния от мишени до пластины –  $R_{мп}$  равных 50 мм и 100 мм соответственно в режиме построения графика «Все точки» и для  $R_{мп} = 150$  мм в режиме построения графика «По точкам». Расчетные значения параметров процесса  $I_p/I_m$  и  $R$  представлены для текущего значения  $R_{мп} = 150$  мм при шаге по расстоянию от центра пластины  $dR = 10$  мм. При пошаговом построении графика  $I_p/I_m = f(R)$  в нижней правой части формы в соответствующих полях отображаются расчетные текущие значения  $R$  и  $I_p/I_m$ . В данном случае при  $R = 170$  мм значение  $I_p/I_m = 0.1549$ .

Назначения кнопок <Помощь Схема>, <График>, <Ввод  $R$  и  $I_p/I_m$ >, <Построение  $R$  и  $I_p/I_m$ >, <Очистка графика>, <Координаты (X,Y)>, <Помощь (X,Y)> и <ВЫХОД> в режиме построения графиков зависимостей  $I_p/I_m = f(R)$  аналогичны рассмотренному выше.

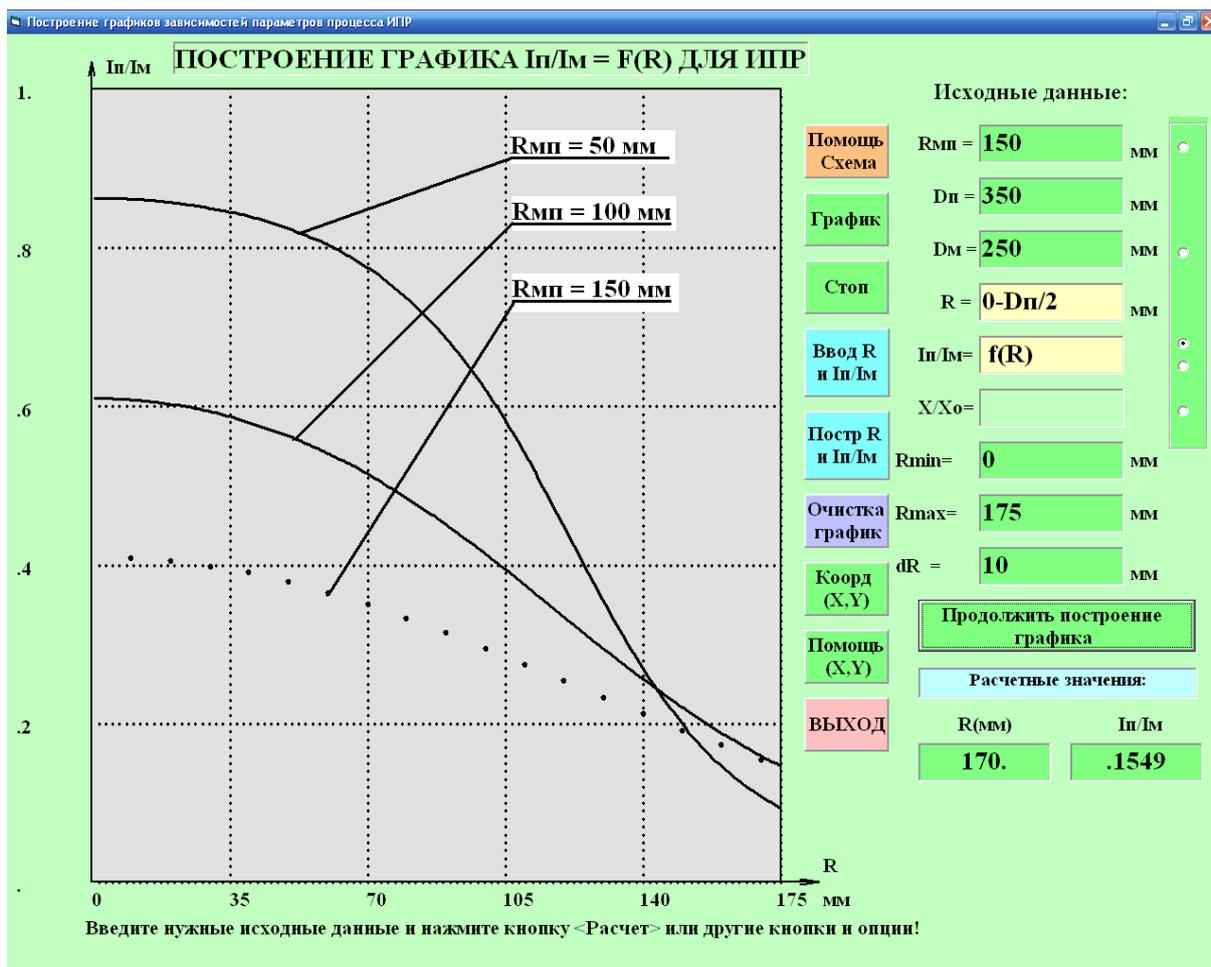


Рис.4.9. Интерфейс программы расчета параметров процесса ионно-плазменного распыления при построении графиков зависимостей  $I_p/I_m = f(R)$  для трех значений  $R_{мп}$ .

На рис.4.10 представлены пять графиков распределения по толщине тонкопленочного покрытия на поверхности пластины при проведении процесса ионно-плазменного распыления, то есть графики функции  $X/X_0 = f(R)$ , в диапазоне изменения величины  $R$  от 0 до 175 мм, для значений расстояния от мишени до пластины –  $R_{мп}$  равных 10, 30, 50, 70, и 90 мм соответственно в режиме построения графика «Все точки».

### **5. Порядок и методика выполнения лабораторной работы**

1. Изучить физические основы процесса ионно-плазменного распыления.
2. Подготовить необходимые таблицы для записи результатов расчетов процесса ионно-плазменного распыления.
3. Провести расчеты процесса ионно-плазменного распыления в соответствии с полученным от преподавателя заданием.
4. Оформить отчет по результатам расчетов в виде таблиц и графиков.
5. Провести анализ полученных результатов расчетов и представить **ВЫВОДЫ**.

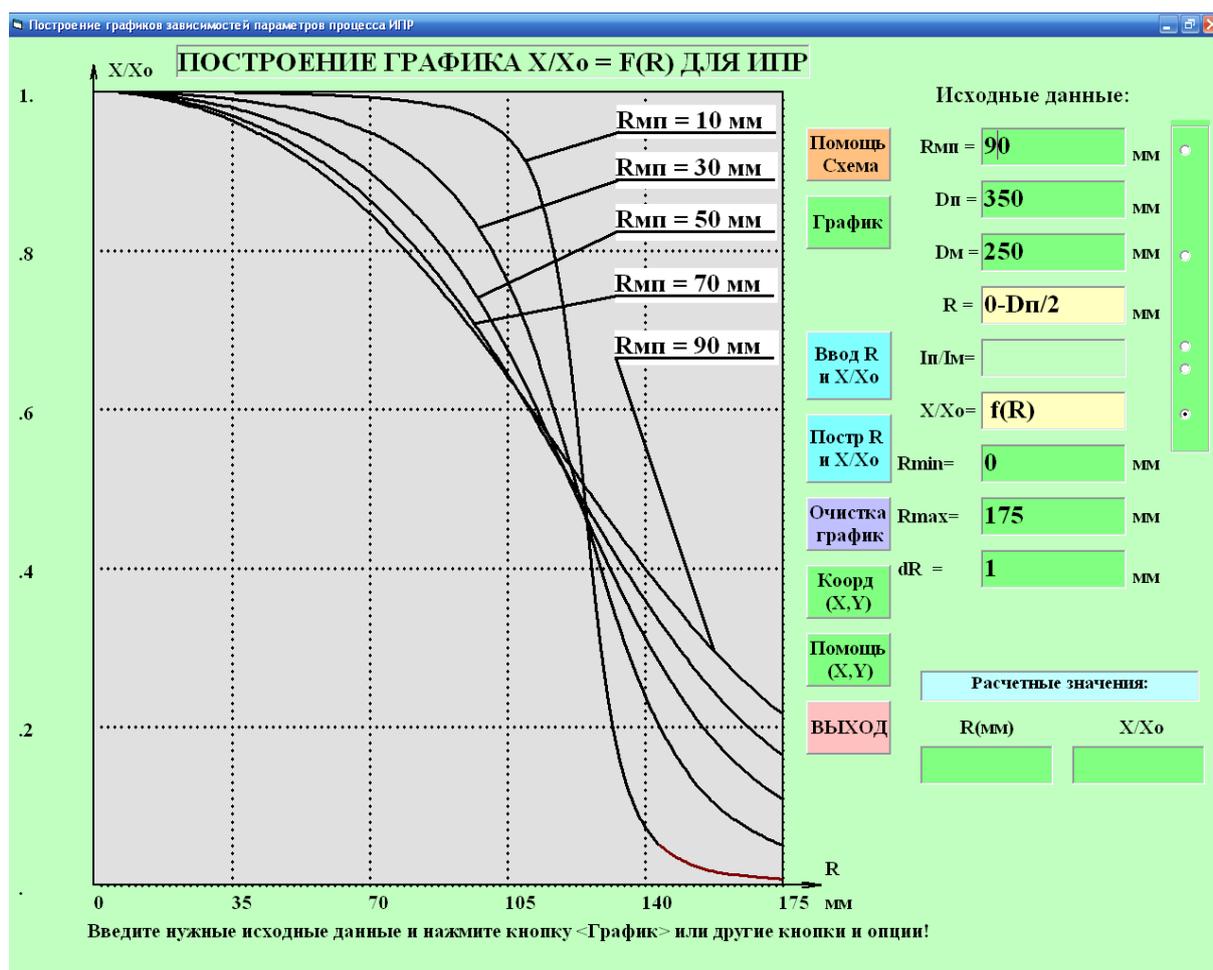


Рис.4.10. Интерфейс программы расчета параметров процесса ионно-плазменного распыления при построении графиков распределения по толщине тонкопленочного покрытия по поверхности пластины  $X/X_o = f(R)$  для пяти значений  $R_{мп}$ .

### **6. Требования к отчету по лабораторной работе**

1. Написать название и цель проведения лабораторной работы. Записать в краткие сведения о физических основах процесса ионно-плазменного распыления.
3. Представить результаты расчетов геометрических параметров проведения процесса ионно-плазменного распыления.
4. Представить расчетные значения геометрических параметров процесса, а также графики зависимостей параметров процесса в соответствии с полученным заданием от преподавателя.
5. Представить в отчете выводы по полученным данным.

### **7. Контрольные вопросы**

1. Что является одним из важнейших отличий процесса ионно-плазменного распыления от процесса вакуумного термического испарения?
2. Каковы основные достоинства ионно-плазменного распыления тонких пленок?

3. В чем различие ионно-плазменного и ионно-лучевого процесса нанесения пленок?
4. На какие этапы можно разделить процесс ионно-плазменного распыления?
5. От чего зависит коэффициент распыления мишени?
6. Каково пространственное распределение распыленных частиц при распылении аморфных и поликристаллических мишеней?
7. От чего зависит вид энергетического спектра распыленных частиц?
8. Чем определяется эффективность ионного распыления?
9. Как влияет этап переноса распыленного вещества на формирование пленок?
10. Что такое коэффициент термической аккомодации?

#### **8. Указания по технике безопасности**

1. Соблюдать правила ТБ при работе на электрооборудовании.
2. Не приступать к выполнению работы без вводного инструктажа по ТБ преподавателем, ведущим занятие.
3. Строго соблюдать все указания преподавателя.

#### **9. Литература**

1. Грибков В.А., Григорьев Ф.И., Калинин Б.А., Якушин В.Л. Перспективные радиационно-пучковые технологии обработки материалов. – М.: Круглый год. 2001. – 528 с.
2. Данилин Б.С. Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. – М.: Энергоатомиздат. 1989. – 328 с.
3. Данилин Б.С., Сырчин В.К. Магнетронные распылительные системы. – М.: Радио и связь. 1982. – 72 с.
4. Ивановский Г.Ф., Петров В.И. Ионно-плазменная обработка материалов. – М.: Радио и связь. 1986. – 232 с.
5. Плазменная технология в производстве СБИС. / Под ред. Н.Айнспрука, Д.Брауна. Пер. с англ. – М.: Мир. 1987. – 470 с.

Методические указания рассмотрены на заседании кафедры Физических основ электронной техники (17 января 2011 г. Протокол № 6) и рекомендованы к использованию в учебном процессе.

Заведующий кафедрой ФОЭТ  
профессор, д. т. н.

Быков Д.В.

## Содержание

### Моделирование распределения осаждаемых частиц по поверхности подложки при ионно-плазменном нанесении тонких пленок

1. Цель лабораторной работы . . . . .	3
2. Введение .. . . .	3
3. Формирование пленок материалов в процессах ионно-плазменного нанесения . . . . .	4
3.1. Характеристика процесса ионно-плазменного нанесения . . . . .	4
3.2. Распыление материала мишени. . . . .	5
3.3. Перенос распыленного материала в пространстве мишень-подложка . . . . .	9
3.4. Осаждение материала на подложке. . . . .	11
3.5. Загрязнение пленок материалов, полученных ионно-плазменным нанесением . . . . .	14
3.6. Ионное осаждение материалов. . . . .	16
4. Описание программного обеспечения для расчета параметров процесса ионной имплантации в полупроводники . . . . .	17
5. Порядок и методика выполнения лабораторной работы . . . . .	29
6. Требования к отчету по лабораторной работе . . . . .	30
7. Контрольные вопросы по лабораторной работе . . . . .	30
8. Указания по технике безопасности . . . . .	31
9. Литература . . . . .	31

### *Учебное издание*

*Моделирование распределения осаждаемых частиц по поверхности подложки при ионно-плазменном нанесении тонких пленок*

### *Составители*

*ГРИГОРЬЕВ Федор Иосифович  
ЧЕРНОВ Аркадий Алексеевич*

*Редактор С.П.Клышинская  
Технический редактор О.Г.Завьялова*

*Подписано в печать 03.03.11. Формат 60x84/16. Бумага типографская.  
Печать-ризография. Усл. печ.л.2.0.Уч.-изд.л. 1,9. Изд. № 23. Тираж 50 экз.  
Заказ 75*

*Московский государственный институт электроники и математики.  
109028, Москва, Б. Трехсвятительский пер., 3.  
Отдел оперативной полиграфии Московского государственного  
института электроники и математики.  
113053, Москва, ул. М. Пионерская, 12.*