

Гончаров В.В.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМИССИИ АТОМОВ МЕТАЛЛА ПРИ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКЕ МИШЕНИ

В статье исследован вопрос распыления материала мишени при его ионной бомбардировке. Рассмотрены существующие математические модели для изучения взаимодействия ионов с веществом при ионной имплантации. Выбрана оптимальная модель определения коэффициента распыления и на её основе создана компьютерная программа "КЕА", позволяющая производить расчет эмиссии атомов мишени в зависимости от внешних факторов. Проведен сравнительный анализ результатов расчета по полученной программе с данными из литературы.

Ключевые слова: ионная имплантация, ион, эмиссия, компьютерная модель, коэффициент распыления

Актуальность исследования. Для придания новых свойств материалам используется широкий спектр различных технологий. В этом плане отлично себя зарекомендовали ионно-плазменные технологии. Одной из перспективных технологий ионной обработки материалов является ионная имплантация. Суть её заключается в направлении на деталь потока ионов, сгенерированных в ионном источнике. В условиях глубокого вакуума при напряжении до 1 кВ синтезируется плазма из рабочего газа (аргон, азот, водород и т.д.). Ионы плазмы бомбардируют мишень из целевого металла (титан, алюминий, никель, молибден и др.), вызывая эмиссию атомов из неё. Выбитые атомы ионизируются и вместе с ионами плазмообразующего газа, ускоряясь в электромагнитном поле, направляются на обрабатываемую поверхность.

Обработка ионами может приводить к эрозии поверхности, осаждению материала с образованием пленок и имплантации частиц в поверхностный слой. В указанных случаях наблюдается изменение микрогеометрии, состава, оптических, физико-химических и др. свойств поверхности, что сказывается на физико-механических и химических характеристиках материала. Степень воздействия на подложку при имплантации зависит от большого количества факторов: материала подложки, материала мишени и рабочего газа, напряженности электромагнитного поля, длительности обработки и т.д. Учесть все факторы в одной зависимости и просчитать конечный результат заранее не представляется возможным. Потому актуальным является поиск возможных алгоритмов определения конечного результата и оптимального режима работы установки, в частности, с помощью компьютерного моделирования.

Постановка проблемы. Основной проблемой при описании процессов, сопровождающих ионную имплантацию, является отсутствие возможности непосредственного наблюдения за ионами и измерения глубины воздействия. Процессы, происходящие при указанной обработке, сложны для математического описания и потому, для получения целостной картины происходящего, крайне необходимо использовать компьютерные модели.

Теоретический анализ исследования. Несмотря на проблемы, связанные со сложностью протекающих процессов, эмпирические данные позволили выработать некоторые модели и расчетные зависимости [1-7]. При определении глубины проникновения совокупность взаимодействий иона с материалом подложки хорошо описывается моделью Юдина В.В., согласно которой полный пробег частицы R определяется из соотношения [8, 9]:

$$R = \frac{1}{N} \int_0^{E_0} \frac{dE}{S_n(E) + S_e(E)} \quad (1)$$

где R – полный пробег иона с начальной энергией E_0 ;

S_e , S_n – поперечное сечение электронного торможения (электронная тормозная способность) и поперечное сечение ядерного торможения (ядерная тормозная способность) соответственно.

Модель Линхарда-Шарфа-Шюте (ЛШШ) [9, 10] для описания поведения ионов при имплантации применима при следующих допущениях: мишень считается аморфной; энергия, передаваемая атомам мишени в процессе столкновений, много меньше кинетической энергии иона; основными механизмами торможения частиц в подложке являются неупругие соударения с электронами (электронное торможение) и упругие соударения с ядрами (ядерное торможение); при описании взаимодействия иона с атомами подложки используется классическое приближение бинарных столкновений. Согласно данной модели пробег можно определить по зависимости:

$$R = 2 \frac{\sqrt{E}}{k_e} - \frac{\ln(1 + 2k_n k_e \sqrt{E})}{k_n k_e^2} \quad (2)$$

где k_e и k_n – коэффициенты электронной и ядерной замедляющей способности:

$$k_e = \frac{S_e}{\sqrt{E}}, \quad (3)$$

$$k_n = \frac{0,5}{S_n} \quad (4)$$

Для определения концентрации примесей в слое необходимо воспользоваться законом нормального распределения Гаусса [8, 9]:

$$C(x) = \frac{D}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - R_p}{\Delta R_p} \right)^2 \right] \quad (5)$$

где $C(x)$ – концентрация имплантированных ионов на глубине x , см⁻³;

D – доза имплантации, см⁻²;

R_p – проективный пробег, см;

ΔR_p – дисперсия проективного пробега, см;

x – глубина, для которой выполняется расчет концентрации примеси, см.

Максимальная концентрация примеси C_{\max} , которая соответствует глубине равной нормальному пробегу R_p , рассчитывается по формуле:

$$C_{\max} = \frac{D}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \quad (6)$$

При рассмотрении наклонной имплантации учитывается угол падения ионного потока α к нормали и распределение имплантированных ионов определяется по следующей зависимости:

$$C(x) = \frac{D}{\sqrt{2\pi}\Delta R} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - R_p \cos \alpha}{\Delta R} \right)^2 \right] \quad (7)$$

где ΔR – среднеквадратичное отклонение полного пробега.

В работе [11] на основании моделей Юдина и ЛШШ построена компьютерная модель, позволяющая точно, согласно экспериментальным данным, рассчитывать глубину распределения и концентрацию ионов в материале подложки в широком спектре рабочих напряжений. Программа "RIO" на основании данной модели позволяет определять необходимые параметры при нормальной, наклонной имплантации, а также учитывает диффузию частиц в слое с течением времени. Кроме того, в программе заложена возможность расчета для многослойных подложек, то есть, реализован вариант последовательной имплантации.

Таким образом, с помощью указанных методов решается вопрос взаимодействия ионов с подложкой. Однако существует проблема, связанная с тем, что при ионной имплантации металлов поток ионов, генерируемый в источнике ионов, попутно содержит также и ионы рабочего газа. В этом случае в вышеприведенные зависимости необходимо вносить коррективы, связанные с присутствием в ионном потоке различных ионов, что приводит к необходимости исследовать и построить модель процессов, происходящих на мишени – источнике ионов.

Цель статьи. Целью данной работы является изучение процессов, протекающих на мишени с целевым компонентом, и построение модели, позволяющей прогнозировать и подбирать режим для генерирования ионного пучка при проведении ионной имплантации.

Задачи исследования. Задача данного исследования – создание компьютерной программы, моделирующей эмиссию ионов целевого металла из мишени.

Математическая модель процесса. Физически процесс эмиссии ионов из мишени выглядит следующим образом. В источнике ионов при определенном давлении и напряженности электромагнитного поля происходит генерирование разряда между анодом и катодом-мишенью. Атомы рабочего газа, попадая в разрядный промежуток, ионизируются и направляются внешним полем на катод. Атомы мишени, лежащие близко к

поверхности, получают от ионов энергию достаточную для выхода и покидают её. Это явление называется распылением мишени.

Для построения математической модели распыления (эмиссии) мишени необходимо учесть тот факт, что характер выбивания атомов зависит от множества факторов, а мерой процесса при этом служит величина, называемая коэффициентом распыления. Определяется коэффициент распыления S как отношение количества выбитых частиц к количеству попавших на мишень.

Согласно теории Фальконе-Зигмунда [9, 12] коэффициент распыления S имеет вид:

$$S = S_0 \left(1 - \frac{E_0}{E}\right)^2 (\cos \alpha)^{-n} \quad (8)$$

где S_0 – коэффициент распыления при перпендикулярном облучении мишени, ион/атом;

E_0 – пороговое значение энергии распыления, эВ;

E – энергия ионов, эВ;

α – угол отклонения потока ионов от нормали, градусы;

n – показатель степени (для большинства случаев равен 5/3).

При нормальном падении ионов на мишень в предположении линейного каскада смещений Зигмунд предложил зависимость:

$$S_0 = 0,42 \frac{\alpha(M_2/M_1)}{E_s} S_n(E_0) \cdot 10^{15} \quad (9)$$

где E_s – энергия сублимации материала мишени, эВ.

На основе теории ЛШШ разработана методика определения коэффициента распыления с учетом тормозных способностей иона в мишени:

$$S_0 = \frac{3,56 M_1 S_n(\varepsilon) \alpha(M_2/M_1)}{(Z_1^{0,5} + Z_2^{0,5})(M_1 + M_2) E_s} \quad (10)$$

где $S_n(\varepsilon)$ – сечение упругого торможения;

M_1 – атомная масса материала мишени, г/моль;

M_2 – атомная масса иона, г/моль;

α – функция отношения (M_2/M_1);

Z_1 – порядковый номер в таблице Менделеева элемента материала мишени;

Z_2 – порядковый номер в таблице Менделеева элемента плазмообразующего газа.

Приведенные зависимости дают хорошие результаты для распыления материала подложки, т.к. в этом случае энергия ионов составляет десятки и сотни кэВ, а в материале преобладает ядерное торможение. Однако при рассмотрении вопроса распыления мишени необходимо учесть, что энергии в данном случае составляют порядка 1-3 кэВ, а ионы испытывают в основном электронное торможение. Поэтому можно упростить формулу для определения коэффициента распыления до вида:

$$S_0 = \frac{20E(M_2/M_1)Z_1^2 Z_2^2}{E_s(E + 50Z_1 Z_2)} \quad (11)$$

где E – энергия ионов, эВ;

M_1 – атомная масса материала мишени, г/моль;

M_2 – атомная масса иона, г/моль;

E_s – энергия сублимации материала мишени, эВ;

Z_1 – порядковый номер в таблице Менделеева элемента материала мишени;

Z_2 – порядковый номер в таблице Менделеева элемента плазмообразующего газа.

Зависимость (11) взята за базовую для построения компьютерной модели в данной работе.

Компьютерная модель процесса.

По приведенной методике определения доли ионов в корпускулярном потоке была создана программа "КЕА" в среде "Delphi 7", которая позволяет точно определить коэффициент распыления мишени (рис. 1). Для работы программы пользователю достаточно ввести данные о материале мишени, рабочем газе и значения электрических параметров ионного источника.

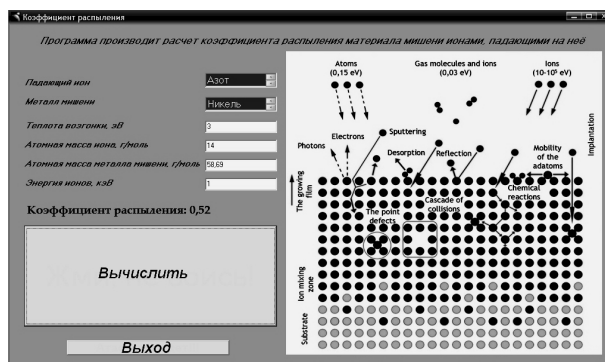


Рис. 1. Диалоговое окно программы "КЕА"

Для проверки достоверности результатов расчета по полученной программе провели сравнительный анализ данных программы "КЕА" и данных, опубликованных в литературе [13]. Результаты сравнения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительные значения коэффициентов распыления для некоторых металлов, вычисленные по программе "КЕА" и взятые из источника [13]

Материал мишени	Падающий ион							
	N ⁺ с энергией, кэВ				N ₂ ⁺ с энергией, кэВ			
	1		3		1		3	
	"КЕА"	[13]	"КЕА"	[13]	"КЕА"	[13]	"КЕА"	[13]
Никель	0,52	0,7	1,12	1,2	1,05	1,1	2,24	2,0
Молибден	0,15	0,15	0,35	0,35	0,29	0,3	0,69	0,6
Вольфрам	0,1	0,15	0,26	0,3	0,2	0,2	0,51	0,5

Из данных таблицы видно, что результаты расчета коэффициентов распыления для никеля, молибдена и вольфрама обладают достаточной сходимостью. В большей степени совпадение значений наблюдается при значениях энергий близких к 3 кэВ.

Выводы. В результате проведенных исследований удалось построить компьютерную модель, реализованную в программе "КЕА". Расчет по данной модели позволяет получать достаточно достоверные данные по коэффициентам распыления различных по материалам мишеней. Благодаря этому становится возможным варьирование долей целевых ионов в ионном потоке, попадающем из источника ионов на обрабатываемую подложку.

Физико-химические и механические свойства поверхности во многом зависят от состава ионного потока, то есть от степени распыляемости материала мишени (Ni, Mo, Ti, W и др.) в плазме рабочего газа (N, He, H). Таким образом, подбор оптимального коэффициента распыления позволяет прогнозировать и контролировать свойства обрабатываемой детали с помощью режима работы установки. Результаты исследования имеют научную и практическую ценность и актуальны в области материаловедения, обработки материалов, нанотехнологий и т.д.

Литература

1. Тонкие пленки – взаимная диффузия и реакции / [под. ред. Дж. Поута, К. Ту, Дж. Мейера] – М.: Мир. – 1982. – 576 с.
2. Хирвонен Дж. К. Ионная имплантация / Хирвонен Дж. К. – М.: Металлургия, 1985. – 285 с.
3. Зеленский В. Ф. Радиационные дефекты и набухание металлов / Зеленский В. Ф., Неклюдов И. М., Черняева Т. П. – К.: Наукова думка, 1988. – 296 с.
4. Модификация свойств металлов под действием ионных пучков / Погребняк А. Д., Ремнев Г. Е., Чистяков С. А. [и др.] // Изв. ВУЗов. Физика. – 1987. – №1. – С. 52-65.
5. Риссел Х. Ионная имплантация: Пер. с нем. В. В. Климова, В. Н. Пальянова / Х. Риссел, И. Руге. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 360с.
6. Бойко В. И. Влияние дефектности структуры металлов на профиль распределения внедренных ионов / Бойко В. И., Кадлубович Б. Е., Шаманин И. В. // Физика и химия обработки материалов. – 1991. – № 3. – С. 56-61.
7. Костерин К. В. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой: адатомные механизмы и возможная роль фононов / Костерин К. В. // Физика и химия обработки материалов. – 1995. – № 3. – С. 43-48.
8. Никоненко В. А. Математическое моделирование технологических процессов: Моделирование в среде MathCAD. Практикум / Никоненко В. А. – М.: МИСиС, 2001. – 48 с.
9. Бобыль А. В. Физико-химические основы технологии полупроводников. Пучковые и плазменные процессы

в планарной технологии: Учеб. Пособие / Бобыль А. В., Карманенко С. Ф. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2005. – 113 с.

10. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой / [Под ред. Р. Бериша] – М.: Мир. – 1986. – 488 с.
11. Гончаров В. В. Компьютерная модель ионной имплантации / В. В. Гончаров, А. А. Черный, С. В. Машенко // Сучасні інформаційні технології в економіці, менеджменті та освіті : III Всеукраїнська науково-практична конференція, 21 листопада 2012 р. : Матеріали конференції. – Львів, 2012. – С.255–259.
12. Фальконе Д. Теория распыления / Фальконе Д. // УФН. – 1992. – Т.162, №1. – С. 71-117.
13. Физика тонких пленок : современное состояние исследований и технические применения : Пер. с англ. В. Б. Сандомирского. Т. 3 / [под. ред. Г. Хасса, Р. Э. Туна] – М.: Мир. – 1988. – 332 с.

У статті досліджено питання розпилення матеріалу мішені при його іонному бомбардуванні. Розглянуто існуючі математичні моделі для вивчення взаємодії іонів з речовиною при іонній імплантації. Обрана оптимальна модель визначення коефіцієнта розпилення і на її основі створена комп'ютерна програма "КЕА", що дозволяє проводити розрахунок емісії атомів мішені в залежності від зовнішніх факторів. Проведено порівняльний аналіз результатів розрахунку за отриманою програмою з даними з літератури.

Ключові слова: іонна імплантація, іон, емісія, комп'ютерна модель, коефіцієнт розпилення

Гончаров В.В. - канд.хим.наук, доцент кафедри «ОФТМ», ИХТ ВНУ им. В.Даля (г. Рубежное)

Рецензент: Попов Э.В. докт.техн.наук, заведующий кафедрой экологии, ИХТ ВНУ им. В.Даля (г. Рубежное)

Honcharov V.V.

COMPUTER SIMULATION OF THE EMISSION OF METAL ATOMS AT THE IONIC BOMBARDMENT OF THE TARGET

The question of target material sputtering under ionic bombardment is studied in the article. The existing mathematical models for study of the interaction of ions with matter by ionic implantation are examined. The optimal model for determining the sputtering coefficient is selected. Based on it a computer program "KEA", which allows to calculate the emission of target atoms depending on external factors is created. A comparative analysis of the calculation results obtained by the program with data from the literature is given.

Keywords: ionic implantation, ion emission, the computer model, the sputtering coefficient

Relevance of research. A wide range of different technologies is used to impart new properties to materials. In this context, ion-plasma technologies are well-proven. Ionic implantation is one of the most promising technologies of ionic processing of materials. Its essence is in the direction on the item of ionic flux generated in the ion source. In deep vacuum conditions at a voltage of 1 kV plasma is synthesized from the working gas (argon, nitrogen, hydrogen, etc.). Ions from the plasma bombard the target from desired metal (titanium, aluminum, nickel, molybdenum, etc.), causing emission of atoms from it. Beated out atoms are ionized and with ions of the plasma gas are accelerated in an electromagnetic field and are directed onto the surface.

Processing by the ions may cause erosion of the surface, deposition of the material with forming a film and implantation of the particles in the surface layer. In these cases, changes in micro-geometry, composition, optical, physical, chemical and other properties of the surface, which affects the physical, mechanical and chemical characteristics of the material, are observed. The degree of influence on the substrate during implantation depends on a number of factors: the material of the support, the target material, process gas, electromagnetic field intensity, duration of treatment and etc. It is not possible to consider all the factors in one dependency and to calculate the final result in advance. Therefore the search of possible algorithms for determining the final result and optimum operating mode of the installation, in particular, with the help of computer simulations is relevant.

Statement of the problem. The main problem in the description of the processes, accompanying ionic implantation, is inability of direct observation of the ions and measuring the depth of influence. Processes taking place at the indicated processing are difficult for mathematical description. Therefore it is necessary to use computer models to get a complete picture of the situation.

Theoretical analysis of the study. Despite the problems associated with the complexity of the processes, the empirical data allowed to develop some models and calculated dependencies [1-7]. In determining the depth of implantation the complex of interactions of ion with the substrate material is well described by the model V.V. Yudin, according to which the total range of the particle R is determined from the ratio [8, 9]:

$$R = \frac{1}{N} \int_0^{E_0} \frac{dE}{S_n(E) + S_e(E)} \quad (1)$$

where R – the full range of the ion with the initial energy E_0 ;

S_e , S_n - a cross-section of the electronic braking (electronic stopping power) and nuclear stopping cross section (nuclear stopping power) respectively.

Model Lindhard-Scharff-Shiotte (LShSh) [9, 10] for describing the behavior of ions at the implantation is applicable under the following assumptions: it is considered the target is amorphous; energy transferred to the target atoms in the collision is much less than the ion kinetic energy; basic mechanisms of inhibition particles in the substrate are none resilient collisions with electrons (electronic braking) and resilient collisions with nuclei (nuclear stopping); in describing the interaction of an ion with the atoms of the substrate is used the classical approximation of binary collisions. According to this model, range can be determined by functional dependence:

$$R = 2 \frac{\sqrt{E}}{k_e} - \frac{\ln(1 + 2k_n k_e \sqrt{E})}{k_n k_e^2} \quad (2)$$

where k_e and k_n - coefficients of electron and nuclear decelerating abilities:

$$k_e = \frac{S_e}{\sqrt{E}}, \quad (3)$$

$$k_n = \frac{0,5}{S_n} \quad (4)$$

To determine the concentration of impurities in the layer is necessary use the law of the normal Gaussian distribution [8, 9]:

$$C(x) = \frac{D}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - R_p}{\Delta R_p}\right)^2\right] \quad (5)$$

where $C(x)$ – the concentration of the implanted ions to a depth of x , sm^{-3} ;

D – implantation dose, sm^{-2} ;

R_p – projective range, sm ;

ΔR_p – the dispersion of the projected range, sm ;

x – the depth for which the calculation of the impurity concentration is performed, sm .

The maximum impurity concentration C_{\max} , which corresponds to a depth that is equal the normal range R_p , is calculated as:

$$C_{\max} = \frac{D}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \quad (6)$$

In considering of the inclined implantation angle of incidence of ion flux α to the normal is accounted and distribution of implanted ions is determined by the following dependence:

$$C(x) = \frac{D}{\sqrt{2\pi}\Delta R} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - R_p \cos \alpha}{\Delta R}\right)^2\right] \quad (7)$$

where ΔR - the standard deviation of the total range .

In [11], the computer model, allowing precisely, according to experimental data, to calculate the depth distribution and concentration of ions in the substrate material in a wide variety of operating voltages is built based on models Yudina and LShSh. Program "RIO" on the basis of this computer model allows to determine the necessary parameters at normal, inclined implantation, and also takes into account diffusion of particles in the layer over time. Moreover, the program can calculate multilayer substrate, i.e. it is implemented option of consistent implantation in it.

Thus, using the above methods the problem of interaction of ions with the substrate is solved. However, there is a problem that in the ionic implantation of metals ions stream, generated in the ion source, in passing also comprises the working gas ions. In this case, in the foregoing dependences it is necessary to make adjustments related to the presence

in the ion flux of different ions, which leads to the need to explore and build a model of the processes occurring on the target - ion source.

The purpose of the article. The aim of this paper is studying of the processes, occurring on the target with the target component, and construction of the model that allows to predict and select mode for generating an ion beam during ionic implantation.

Objectives of the study. The objective of this research is the creation of a computer program modeling the emission of ions from the target metal target.

A mathematical model of the process. Physically, the process of ion emission from the target looks as follows. In the ion source discharge between the anode and the cathode target is generated at certain pressure and the electromagnetic field. Atoms of the working gas, getting in the discharge gap, are ionized and sent by the external field to the cathode. Target atoms lying close to the surface, get enough energy from the ions to exit and leave it. This phenomenon is called sputtering.

To construct a mathematical model of the sputtering (emission of the atoms) of target should take into account the fact that the character of the removal of atoms depends on many factors, and measure of process in this case is a quantity called the sputtering coefficient. Sputtering coefficient S is defined as the ratio of the number of sputtered particles to the number of particles which have got on target.

According to the theory Falkone-Sigmund [9, 12] the sputtering coefficient S has the form:

$$S = S_0 \left(1 - \frac{E_0}{E}\right)^2 (\cos \alpha)^{-n} \quad (8)$$

where S_0 – sputtering coefficient at perpendicular irradiation of the target, ion/atom;

E_0 – threshold of sputtering energy, eV;

E – ion energy, eV;

α – angle of deviation of the ion flux from the normal, degrees;

n – the exponent (in most cases equal to 5/3).

At normal incidence of ions on the target Sigmund proposed dependence assuming a linear displacement cascade:

$$S_0 = 0,42 \frac{\alpha(M_2/M_1)}{E_s} S_n(E_0) \cdot 10^{15} \quad (9)$$

where E_s – sublimation energy of the target material, eV.

Based on the theory LShSh and taking into account stopping power of the ion in the target the technique of definition of the sputtering coefficient is developed:

$$S_0 = \frac{3,56M_1 S_n(\varepsilon) \alpha(M_2/M_1)}{(Z_1^{0,5} + Z_2^{0,5})(M_1 + M_2) E_s} \quad (10)$$

where $S_n(\varepsilon)$ – cross section of resilient braking;

M_1 – the atomic mass of the target material, g/mol;

M_2 – the atomic mass of the ion, g/mol;

α – function of the ratio (M_2/M_1);

Z_1 – the sequence number of the element in the periodic table of the target material;

Z_2 – the sequence number of the element in the periodic table of the plasma gas.

The above dependences give good results for spraying the substrate material, because in this case the energy of the ions amounts to tens and hundreds of keV and nuclear stopping is dominated in the material. However, when considering the problem target sputtering should note that in this case the energy are of the order of 1-3 keV and ions

are braked mainly by electrons. Therefore, we can simplify the formula for determining the sputtering coefficient to form:

$$S_0 = \frac{20E(M_2 / M_1)Z_1^2 Z_2^2}{E_s(E + 50Z_1 Z_2)} \quad (11)$$

where E – ion energy, eV;

M_1 – the atomic mass of the target material, g/mol;

M_2 – the atomic mass of the ion, g/mol;

E_s – sublimation energy of the target material, eV;

Z_1 – the sequence number of the element in the periodic table of the target material;

Z_2 – the sequence number of the element in the periodic table of the plasma gas.

Equation (11) is taken as the base for creation the computer model in this paper.

Computer model of the process.

For the above method of determining the proportion of ions in the corpuscular stream the program "KEA" in the medium "Delphi 7" was created. This program allows to determine exactly the sputtering coefficient of target (Fig. 1). For the program operation user only has to enter data on the target material, the working gas and electrical parameters of the ion source.

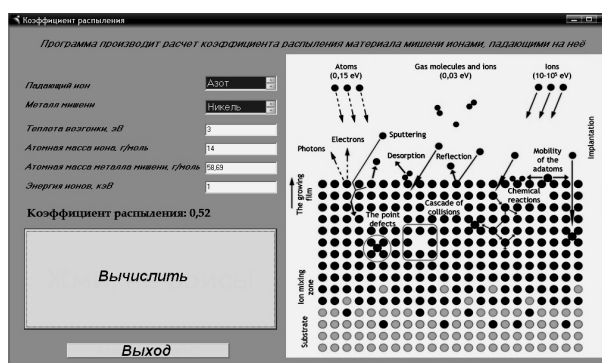


Fig. 1. Dialog window of "KEA"

For the validating of the results obtained by the program calculating a comparative analysis of the data of the "KEA" and the data published in the literature was carried out [13]. The comparison results are shown in Table 1.

Table 1

Comparative values of sputtering coefficients for some metals, calculated by the program "KEA" and taken from the source [13]

Target material	Incident ion							
	N ⁺ with an energy, keV				N ₂ ⁺ with an energy, keV			
	1		3		1		3	
	"KEA"	[13]	"KEA"	[13]	"KEA"	[13]	"KEA"	[13]
Nickel	0,52	0,7	1,12	1,2	1,05	1,1	2,24	2,0
Molybdenum	0,15	0,15	0,35	0,35	0,29	0,3	0,69	0,6
Tungsten	0,1	0,15	0,26	0,3	0,2	0,2	0,51	0,5

The table shows that the results of the calculation of the sputtering coefficients of nickel, molybdenum and tungsten have sufficient convergence. To a greater extent coincidence of the values is observed at energies close to 3 keV.

Conclusions. Carried studies allowed us to construct a computer model, implemented in the "KEA". Calculation on this model allows to obtain sufficiently reliable data on the sputtering coefficients for different target materials. This feature makes possible shares variation of target ions in the ion flux incident from the ion source on a processed substrate.

Physical, chemical and mechanical properties of the surface is largely dependent on the composition of the ion flux, i.e. on the degree of dispersibility of the target material (Ni, Mo, Ti, W etc.) in the plasma working gas (N, He, H). Thus, the selection of the optimum sputtering coefficient allows to predict and control the properties of the workpiece by means of mode settings. Results of the study are scientific and practical value and relevance in the field of materials, materials processing, nanotechnology etc.

References

1. Tonkie plenki – vzaimnaja diffuzija i reakcii / [pod. red. G. Pouta, K. Tu, G. Mejera] – M.: Mir. – 1982. – 576 s.
2. Khirvonen G. K. Ionnaja implantacija / Khirvonen G. K. – M.: Metallurgija, 1985. – 285 s.
3. Zelenskij V. F. Radiacionnye defekty i raspukhanie metallov / Zelenskij V. F., Nekljudov I. M., Chernjaeva T. P. – K.: Naukova dumka, 1988. – 296 s.
4. Modifikacija svojstv metallov pod deystviem ionnyh puchkov / Pogrebnyak A. D., Remnev G. E., Chistyakov S. A. [et al] // Izv. VUZov. Fizika. – 1987. – №1. – S. 52-65.
5. Rissel H. Ionnaja implantacija: Per. s nem. V. V. Klimova, V. N. Palyanova / H. Rissel, I. Ruge. – M.: Nauka. Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy litratury, 1983. – 360 s.
6. Bojko V. I. Vliyanie defektnosti struktury metallov na profil raspredelenija vnedrennyh ionov / Bojko V. I., Kadlubovich B. E., Shamanin I. V. // Fizika i himiya obrabotki materialov. – 1991. – № 3. – S. 56-61.
7. Kosterin K. V. Raspylenie tverdyh tel ionnoy bombardirovkoy: adatomnye mehanizmy i vozmozhnaja rol fononov / Kosterin K. V. // Fizika i himiya obrabotki materialov. – 1995. – № 3. – S. 43-48.
8. Nikonenko V. A. Matematicheskoe modelirovanie tekhnologicheskikh processov: Modelirovanie v srede MathCAD. Praktikum / Nikonenko V. A. – M.: MISiS, 2001. – 48 s.
9. Bobyl A. V. Fiziko-himicheskie osnovy tehnologii poluprovodnikov. Puchkovye i plazmennye processy v planarnoy tehnologii: Ucheb. Posobie / Bobyl A. V., Karmanenko S. F. – SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2005. – 113 s.
10. Raspylenie tverdyh tel ionnoy bombardirovkoy / [pod. red. R. Berisha] – M.: Mir. – 1986. – 488 s.
11. Honcharov V. V. Komputernaya model ionnoy implantaciji / V. V. Honcharov, A. A. Cherny, S. V. Maschenko // Suchasni informacijni tehnologii v ekonomici, menedzhmenti ta osviti : III Vseukrajinska naukovopraktychna konferencija, 21 listopada 2012 r. : Materialy konferencii. – Lviv, 2012. – S.255–259.
12. Falkone D. Teorija raspylenija / Falkone D. // UFN. – 1992. – T.162, №1. – S. 71-117.
13. Fizika tonkih plenok : sovremennoje sostojanie issledovaniy i tehniczeskie primenenija : Per. s angl. V. B. Sandomirskogo. T. 3 / [pod. red. G. Hassa, R. E. Tuna] – M.: Mit. – 1988. – 332 s.