Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«ОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ И ИНДИВИДУАЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ»

Омск – 2016

Методические указания разработаны в соответствии с ООП по направлениям подготовки магистратуры:

28.04.02 ***«Наноинженерия»***

Цель самостоятельных занятий - закрепление и углубление полученных теоретических знаний, развитие навыков практической работы.

Теоретическое изучение предмета происходит на лекционных занятиях и при самостоятельной работе студентов, согласно содержанию разделов дисциплины, приведённому в рабочей программе. Практическое ознакомление с предметом происходит при выполнении домашнего задания.

При обучении студентов используется разработанная на кафедре модульная рейтинговая система.

В начале семестра обучающиеся получают задачи для выполнения расчетно-графической работы (домашнее задание).

Самостоятельная работа, ее организация играют большую роль в обучении, а также в **научной** и творческой работе студента вуза. От того, насколько обучающийся подготовлен и включен в самостоятельную деятельность, зависят его успехи в учебе, научной и профессиональной работе.

Результаты учебной деятельности зависят от уровня самостоятельной работы студента, который определяется личной подготовленностью к этому труду, желанием заниматься самостоятельно и возможностями реализации этого желания.

Самостоятельная работа представлена такими ***формами учебного процесса,*** как лекция, подготовка к ним. Студент должен уметь вести краткие записи лекций, составлять конспекты, планы и тезисы выступлений, подбирать литературу и т.д.

Самостоятельная работа осуществляется в виде аудиторных и внеаудиторных форм познавательной деятельности по каждой дисциплине учебного плана.

Самостоятельная работа студентов во внеаудиторное время может предусматривать:

- Проработку лекционного материала, работу с научно-технической литературой при изучении разделов лекционного курса, вынесенных на самостоятельную проработку;
- Подготовку к тестированию;
- Выполнение индивидуальных заданий, предусмотренных учебным планом;

Самостоятельная работа студентов в аудиторное время весьма многообразна и может предусматривать:

- Выполнение самостоятельных работ;
- Решение задач;
- Работу со справочной, методической и научной литературой;
- Защиту выполненных работ;
- Оперативный (текущий) опрос по отдельным темам изучаемой дисциплины;
- Собеседование;
- Тестирование и т.д.

Видами заданий для самостоятельной работы могут быть:

для овладения знаниями:

- чтение текста (учебника, первоисточника, дополнительной литературы);
- составление плана текста;
- графическое изображение структуры текста;
- конспектирование текста;
- выписки из текста;
- работа со словарями и справочниками; ознакомление с нормативными документами;
- учебно-исследовательская работа;
- использование аудио- и видеозаписей, компьютерной техники и Интернета и др.;

для закрепления и систематизации знаний:

- работа с конспектом лекции (обработка текста); повторная работа над учебным материалом (учебника, первоисточника, дополнительной литературы, аудио- и видеозаписей);

- составление плана и тезисов ответа;
- составление таблиц для систематизации учебного материала;
- ответы на контрольные вопросы;
- подготовка сообщений к выступлению на семинаре, конференции;
- тестирование и др.:

для формирования умений:

- решение задач и упражнений по образцу;
- решение вариативных задач и упражнений;
- выполнение расчетно-графических работ.

Виды заданий для самостоятельной работы, их содержание и характер могут иметь вариативный и дифференцированный характер, учитывать специфику специальности, изучаемой дисциплины, индивидуальные особенности студента.

В вузе все виды самостоятельной работы студента подчиняются целям учебного процесса, организуются при его главенстве. Организация самостоятельной работы студентов должна сочетаться со всеми применяемыми в вузе методами обучения и вместе с ними представлять единую систему средств по приобретению знаний и выработке навыков.

Самостоятельная работа направлена на закрепление и углубление полученных теоретических и практических знаний, развитие навыков практической работы.

Руководство по СРС и выполнению индивидуального домашнего задания. Требования к оформлению индивидуального задания

Индивидуальное задание решается в соответствии с номером варианта.

Вариант выполнения индивидуального задания определяется по порядковому номеру в списке группы.

Индивидуальное задание оформляются на листах форматом А4 (с одной стороны листа).

На титульном листе указываются:

- полное наименование образовательного учреждения и соответствующей кафедры;
- тема домашнего задания;
- ФИО студента, номер группы и факультет (институт);
- номер варианта;
- ФИО преподавателя.

Образец оформления титульного листа приведен в Приложении 1.

Порядок оформления решения задач

1. После полного текста задания кратко оформить условие задачи: ввести обозначения всех величин, которые будут использованы в процессе решения задачи, и их числовые значения. Числовые значения, исключая те случаи, когда определяются безразмерные отношения, следует тут же перевести в систему СИ, проставляя рядом соответствующее наименование. В краткой записи условия следует также выписать все искомые величины (или отношения величин) со знаком вопроса.

2. Указать те основные законы и формулы, на которых базируется решение данной задачи. Разъяснить смысл буквенных обозначений, входящих в исходную формулу. Если такая формула является частным случаем фундаментального закона, то ее необходимо вывести из этого закона, используя граничные условия.

3. Сделать чертеж или график, поясняющий содержание задачи (в тех случаях, когда это возможно). Выполнить его надо аккуратно, подобрав оптимальный размер. Рисунок может быть выполнен на компьютере или при помощи карандаша, циркуля, линейки. На

чертеже или графике должны быть нанесены обозначения всех буквенных величин, которые используются в расчетных формулах и могут быть пояснены чертежом.

4. Каждый этап решения задачи сопровождать краткими, но исчерпывающими пояснениями.

5. Произвести расчеты, записать в ответе числовое значение и сокращенное наименование единиц измерения искомой величины.

6. При подстановке в рабочую формулу, а также при выражении ответа числовые значения величин следует записывать как произведение десятичной дроби с одной значащей цифрой перед запятой на десять в соответствующей степени. Например, вместо 3520 надо записать $3{,}52 \cdot 10^{3}$, вместо 0,00129 записать $1{,}29 \cdot 10^{-3}$ и т.д. Рекомендуемая запись числовых значений облегчает расчетные действия с ними, является более компактной и наглядной.

Образец оформления решения задач индивидуального задания приведен в Приложении 2.

Порядок оформления лабораторных работ

Образец оформления лабораторной работы приведен в Приложении 3.

Объем СРС и распределение по видам учебных работ в часах

Очная форма обучения

Вид СРС	Количество часов
	С е м е с т р ы
	3
1. Самостоятельное изучение отдельных тем дисциплины; чтение и изучение учебника и учебных пособий.	26
2. Выполнение домашнего задания	20
3. Подготовка к лабораторным работам	8
ИТОГО по дисциплине	**54**

Обоснование трудоемкости (в часах) на выполнение СРС: объем и распределение часов на выполнение СРС произведено на основании личного опыта преподавателя.

Варианты домашнего задания

При проверке **домашнего задания** ***оценивается следующая деятельность, знания, умения и владениястудента:***

1. умение применять теоретические знания для решения задач;
2. показывает владение методами решения задач;
3. умение применять математический аппарат для получения результата;
4. умение анализировать и объяснять полученный результат;
5. правильность оформления представленных задач:

- задача выполняется согласно варианту
- условие каждой задачи переписать полностью, все числовые значения должны быть приведены в системе СИ
- указание, какие законы исследуются в данной задаче
- объяснение выбора формул для решения
- для пояснения задач, где это необходимо делается чертеж
- пояснение математических операций, с помощью которых делается переход от одних формул к другим
- для получения расчетной формулы для решения конкретной задачи приводится ее вывод
- первоначально задача решается в общем виде, затем проводятся вычисления

Практико-ориентированные задания для направлений:
28.04.02 Наноинженерия».

1. Произвести расчеты пробегов ионов для различных энергий и комбинаций «ион-мишень». Варианты задает преподаватель.

Вариант	Комбинации «ион-мишень»	Энергия иона, кэВ
1	Na-Al	40
2	Cu-Fe	50
3	Al-Mo	60
4	Zr-V	80
5	K-W	90
6	Cu-Ta	100
7	Ti-Fe	110
8	W-Cu	120
9	V-Ta	70
10	Mo-V	40

2. По полученным отпечаткам индентора микротвердомера ПМТ-3М, рассчитать относительную погрешность измерения согласно вариантам. Покрытия наносятся методом магнетронного напыления на стальную матрицу. Варианты задает преподаватель.

Вариант	d_1, делений шк. барабана	d_2, делений шк. барабана	d_3, делений шк. барабана
1	33	33	34
2	51	53	51
3	72	73	73
4	83	84	84
5	76	74	74
6	43	43	44
7	65	68	65
8	77	76	77
9	78	79	78
10	94	97	94

Приложение 1

<u>Образец выполнения титульного листа</u>

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра физики

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА
по дисциплине «Физические основы современных технологий получения покрытий»

«Часть 1»

Выполнил: Иванов Иван Иванович
гр. НИм-161, ФЭОиМ
Вариант № 12

Проверил: Петров П. П.

Омск - 2016

Приложение 2

<u>Образец оформления решения практико-ориентированных заданий</u>

№ 1

Произвести расчеты пробегов ионов для энергии иона 50 кэВ и комбинации «ион-мишень» Cu-Fe.

1. Рассчитать среднее значение:

$$<L> = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5}{5}$$

$$<L> = \frac{39{,}1 + 39{,}2 + 39{,}2 + 39{,}5 + 39{,}4}{5} = 39{,}28 \text{ мм}$$

2. Рассчитать погрешность каждого измерения:

$$\Delta L_i = |<L> - L_i|$$

$$\Delta L_1 = |39{,}28 - 39{,}1| = 39{,}18 \text{ мм}$$
$$\Delta L_2 = |39{,}28 - 39{,}2| = 39{,}08 \text{ мм}$$
$$\Delta L_3 = |39{,}28 - 39{,}2| = 39{,}08 \text{ мм}$$
$$\Delta L_4 = |39{,}28 - 39{,}5| = 39{,}22 \text{ мм}$$
$$\Delta L_5 = |39{,}28 - 39{,}4| = 39{,}12 \text{ мм}$$

3. Рассчитать среднеквадратичную погрешность:

$$S = \sqrt{\frac{{\Delta L_1}^2 + {\Delta L_2}^2 + {\Delta L_3}^2 + {\Delta L_4}^2 + {\Delta L_5}^2}{5(5-1)}}$$

$$S = \sqrt{\frac{39{,}18^{\ 2} + 39{,}08^2 + 39{,}08^2 + 39{,}22^{\ 2} + {39{,}12_5}^2}{5(5-1)}} = 0{,}0334\text{мм}$$

4. Определить случайную погрешность:

$$\Delta L_{\text{сл}} = St_{\alpha,n}$$

$$\Delta L_{\text{сл}} = 0{,}0334 \cdot 2{,}13 = 0{,}0711 \text{ мм}$$

5. Рассчитать абсолютную погрешность:

$$\Delta L = \sqrt{{\Delta L_{\text{сл}}}^2 + {\Delta L_{\text{пр}}}^2}$$

$$\Delta L = \sqrt{0{,}0711^2 + 0{,}05^2} = 0{,}0860 \text{ мм}$$

6. Рассчитать относительную погрешность:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{<L>} 100\%$$

$$\varepsilon = \frac{0{,}086}{39{,}28} 100\% = 0{,}219\%$$

7. Ответ:

$$\begin{cases} L = (39{,}28 \pm 0{,}09)\ \text{мм} \\ \propto = 0{,}9 \\ \varepsilon = 0{,}22\% \end{cases}$$

Приложение 3

<u>Образец оформления лабораторной работы</u>

Министерство образования и науки РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Омский государственный технический университет»

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

РАСЧЕТ ПРОБЕГОВ ИОНОВ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

Выполнил: Глуховеря Е. Г.

Группа: НИм-141

Проверил: Блесман А. И.

Омск

Лабораторная работа № 1

РАСЧЕТ ПРОБЕГОВ ИОНОВ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ

Цель работы: Рассчитать пробег ионов твердом теле при ионной имплантации.

Краткие теоретические сведения

Метод ионной имплантации (ИИ) заключается в бомбардировке мишени ионами, ускоренными до энергий порядка 10^3… 10^6 эВ, в результате чего внедряются в неё, создавая в приповерхностном слое определённоё распределение концентрации примесей. Глубина проникновения ионов зависит от энергии, а также материала мишени. Концентрация легирующей примеси в мишени зависит от количества ионов данной энергии бомбардирующих единицу площади – дозы имплантации.

Основные характеристики ИИ – глубина внедрения, доза имплантации. Процесс может происходить как с напуском газа, так без напуска газа при давлении от 1,33 Па и ниже. Имплантируемый материал (материал катода) выбивается из него, ионизируется и за счёт воздействия высокого напряжения внедряется в мишень.

Метод ионной имплантации позволяет существенно изменить электрические, химические, оптические, механические, эмиссионные свойства материалов. В виду того, что процесс ионной имплантации неравновесный, можно получать сплавы и соединения которые нельзя получить обычными методами, достигнуть такой концентрации внёдрённой примеси, которая превышает пределы растворимости.

2. Расчёт параметров процесса ионной имплантации.

Основные допущения при расчётах [1].

1. Вещество, с которым взаимодействует ион, является однородным и изотропным, а атомы в нём расположены хаотически (мишени аморфные).

2. Упругие и неупругие взаимодействия происходят независимо друг от друга.

3. Упругие и неупругие взаимодействия рассматриваются на основе статистической модели атома Томаса – Ферми, при этом в качестве функции экранирования в потенциале взаимодействия используется Φ:

$$\Phi = \frac{z_1 z_2 e^2}{r} f(r/a) \qquad (1)$$

где z_1 – порядковый номер имплантируемого иона; z_2 – порядковый номер атома мишени; $f(r/a) = a/2r$ – функция экранирования ядер электронами; r – максимальное расстояние, на которое сближаются частицы; a – параметр экранирования.

За основу для расчета параметра экранирования принимается выражение (2):

$$a = 0{,}885 a_0 (z_1^{2/3} + z_2^{2/3})^{-1/2} \qquad (2)$$

где a_0 = 0,0529 нм – радиус первой орбиты в атоме водорода по Бору.

Электронные потери описываются выражением $(dE/dR)_e$, эВ/см (3):

$$\left(\frac{dE}{dR}\right)_e = -2.34 \cdot 10^{23} n (z_1 + z_2) v \qquad (3)$$

где v – скорость иона (см/с); n – количество атомов в 1 см^3 мишени, определяемое по формуле (4):

$$n = \frac{N_A \rho_1}{M_1} \qquad (4)$$

где $N_A = 6.02 \cdot 10^{23} моль^{-1}$ (число Авогадро), ρ_1 – плотность, $г/см^3$; M_1 – молярная масса материала мишени, $г/моль$.

4. Считается, что упругие взаимодействия можно рассматривать как парные, не учитывая состояния внешних электронов в твёрдом теле и зарядовое состояния иона.

5. Потери энергии в каждом акте соударения предполагаются много меньшими, чем энергия иона, что позволяет использовать статистический подход к рассмотрению пробегов ионов и упрощает расчёты.

6. Функции потерь энергии иона в упругих соударениях существенно превосходят таковые для электронных.

7. При описании движения ионов в среде следует учитывать два взаимосвязанных процесса – изменение направления движения ионов (рассеяние) и изменение энергии – торможение. Пробег ионов в мишени определяется по формуле:

$$R = \frac{1}{n}\int_0^E \frac{dE}{S_n + S_e}$$

где R – проекция длинны пробега ионов в твёрдом теле, *мкм*; Е – энергия иона эВ; n – количество атомов в единице объёма, $см^{-3}$; S_n, S_e – ядерная и электронная тормозная способность, $эВ \cdot см^2$.

Ядерная и электронная тормозные способности определяются соответственно соотношениями (6) и (7):

$$S_n = -\frac{1}{n}\left(\frac{dE}{dx}\right)_n \tag{5}$$

$$S_e = -\frac{1}{n}\left(\frac{dE}{dx}\right)_e \tag{6}$$

где $\frac{dE}{dx}$ – потери энергии в слое dx, $эВ/см$.

Ядерная тормозная способность (5) в интегральной форме:

$$S_n = -\int_0^{E_{\max}} E_p d\sigma \tag{7}$$

где $d\sigma = 2\pi p dp$ – дифференциальное сечение; p – прицельное расстояние; E_p – энергия, передаваемая ионами ядрам атома.

При соударении с атомами мишени имплантируемый ион отклоняется на угол φ_0 от своего движения и передает энергию E_p столкнувшимся с ним атомом, в результате чего атом отклоняется на угол φ_1 от оси полёта иона. При изменении значений угла отклонения от 0 до π значение E_p меняется от 0 до $E_{\max}$.

$$E_{\max} = \frac{4EM_1M_2}{\left(M_1 + M_2\right)^2} \tag{8}$$

где M_1 и – молярная масса мишени и M_2 катода, *г/моль*.

Расчет E_p представляет собой известную задачу механики:

$$E_p = \frac{2M_1M_2E(1-\cos\varphi)}{M_1 + M_2} \tag{9}$$

где φ – угол отклонения частицы в системе отсчета центра масс.

В системе отсчета, связанной с центром масс энергия рассчитывается согласно формуле (10):

$$E_{отн} = \frac{M_2E}{M_1 + M_2} \tag{10}$$

Для удобства расчётов введём безразмерные (нормированные) значения энергии (ε), пробега (ρ) и параметра расстояния (t).

$$\varepsilon = \frac{aE_{отн}}{z_1z_2e^2} = \frac{aM_2E}{z_1z_2e^2\left(M_1 + M_2\right)} = C_eE \tag{11}$$

где C_e – коэффициент нормирования.

$$\rho = \frac{4R\pi a^2nM_1M_2}{\left(M_1 + M_2\right)^2} = C_RR \tag{12}$$

$$t = \varepsilon^2\sin^2(\varphi/2) \tag{13}$$

Дифференциальное сечение с учётом соотношения (13) запишем в виде:

$$d\sigma = -\pi a^2\frac{dt}{2t^{3/2}}f(t^{1/2}) \tag{14}$$

Выражения (1) и (14) в большинстве случаев решаются численными методами. Перепишем уравнения (5) и (6) в нормированном виде:

$$\left(\frac{d\varepsilon}{d\rho}\right)_n = S_n\left(\varepsilon\right) = \left(\frac{dE}{dR}\right)_n \cdot \frac{\varepsilon}{E} \cdot \frac{R}{\rho} \tag{15}$$

Выразим из (15) удельные потери как:

$$\left(\frac{dE}{dR}\right)_n = -nS_n = \left(\frac{d\varepsilon}{d\rho}\right)_n \frac{E}{\varepsilon}\cdot\frac{\rho}{R} = \left(\frac{d\varepsilon}{d\rho}\right)_n \cdot\frac{E}{C_e E}\cdot\frac{C_R R}{R} = \left(\frac{d\varepsilon}{d\rho}\right)_n \cdot\frac{C_R}{C_e} \qquad (16)$$

Для соотношения (16) может быть использована аналитическая аппроксимация выражения:

$$\frac{d\varepsilon}{d\rho} = \frac{A\sqrt{\varepsilon}}{B+\varepsilon} \qquad (17)$$

где ε – приведённая энергия, A=0,45 , B=0,3 – коэффициенты.

В диапазоне энергий 0,05 < ε < 10 значения совпадают с вышеизложенной теорией до 10%.

Электронная тормозная способность. При неупругих столкновениях кинетическая энергия иона расходуется на электронные переходы в атомах (или между различными разрешительными зонами твёрдого тела), а также на возбуждение коллективных колебаний электронов.

Электронную тормозную способность можно выразить через дифференциальное сечение:

$$S_e = \int E_e d\sigma_e \qquad (18)$$

Зависимость удельных потерь примет вид:

$$\left(\frac{dE}{dR}\right)_e = -nS_e \qquad (19)$$

Вычислить дифференциальное сечение для конкретных пар «ион–твёрдое» тело очень сложно, поэтому рассмотрим только зависимость сечения торможения от энергии и вида взаимодействующих частиц. В теории О.Б. Фирсова считается, что при сближении соударяющиеся атомы образуют квазимолекулу, происходит обмен электронами. Линейную зависимость получили И. Линдхард и М. Шарф:

$$S_e(\varepsilon) = -k_e \varepsilon^{1/2} \qquad (20)$$

$$k_e = 0.0793 \frac{z_1^{1/2} z_2^{1/2}}{(z_1^{2/3} + z_2^{2/3})^{3/4}} \cdot \frac{(M_1 + M_2)^{3/2}}{M_1^{3/2} M_2^{1/2}} z_1^{1/6} \qquad (21)$$

где k_e – коэффициент нормирования.

Учитывая безразмерные параметры, получим выражение (22):

$$\left(\frac{d\varepsilon}{d\rho}\right)_e = S_e(\varepsilon) = \left(\frac{dE}{dR}\right)_e \cdot\frac{\varepsilon}{E}\cdot\frac{R}{\rho} \qquad (22)$$

В размерном виде:

$$\left(\frac{dE}{dR}\right)_e = -nS_e = \left(\frac{d\varepsilon}{d\rho}\right)_e \frac{E}{\varepsilon}\cdot\frac{\rho}{R} = \left(\frac{d\varepsilon}{d\rho}\right)_e \cdot \frac{E}{C_e E}\cdot\frac{C_R R}{R} = \left(\frac{d\varepsilon}{d\rho}\right)_e \cdot \frac{C_R}{C_e} \tag{23}$$

Учитывая выражение (20) получим выражение для расчета электронных потерь, $эВ/см$:

$$\left(\frac{dE}{dR}\right)_e = S_e(\varepsilon)\cdot\frac{C_R}{C_e} = k_e\varepsilon^{1/2}\cdot\frac{C_R}{C_e} = k_e(C_e E)^{1/2}\cdot\frac{C_R}{C_e} = k_e E^{1/2}\cdot\frac{C_R}{C_e^{1/2}} \tag{24}$$

Следует отметить, что зависимость не является универсальной для любой пары «ион–мишень».

Распределение пробегов ионов.

Пробег иона (*R, см*) определяется с учётом известных ядерных и электронных тормозных потерь может быть рассчитан по формуле:

$$R = \frac{E}{n(S_e + S_n)} = \frac{E}{\left(\frac{dE}{dR}\right)_n + \left(\frac{dE}{dR}\right)_e} \tag{25}$$

Энергия иона определяется по формуле, $эВ$:

$$E = zU \tag{26}$$

где z – кратность заряда иона; U – ускоряющее напряжение, В.

Доза имплантации определяется по формуле:

$$D = \frac{N}{S} = \frac{J\tau t f}{q_e S} \tag{27}$$

где N – количество имплантированных ионов; J – сила тока, A; S – площадь мишени, $см^2$; τ – длительность импульса, $\tau = 2.5\cdot10^{-4}c$; f – частота импульса, $Гц$; q_e – заряд электрона ($q_e = 1.6\cdot10^{-19}\ Кл$); t – время имплантации, *с*.

Разброс значений пробегов ΔR определяется по формуле:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{0.8(M_1 M_2)^{1/2}}{M_1 + M_2} \tag{28}$$

Распределение ионов по глубине проникновения описывается следующей формулой:

$$N(x) = \frac{D}{\sqrt{2\pi}\Delta R}\exp\left[-(x-R)^2/\left(2\Delta R^2\right)\right] \tag{29}$$

где концентрация $N(x)$ рассчитывается в $см^{-3}$.

Расчеты

Вывод по лабораторной работе

Объекты исследования, применяемые исследовательские методики

Полученные результаты

Заключение