

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

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

Кафедра твердотельной электроники

ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОНИКИ И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**к выполнению лабораторных и практических работ
по дисциплине «Технология материалов электронной техники»
для студентов направления
11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника»
всех форм обучения**

Воронеж 2024



УДК 621.38(07)
ББК 32.85я7

Составитель

канд. техн. наук Плотникова Е. Ю.

Технология материалов электроники и нанoeлектроники:
методические указания к выполнению лабораторных и практических работ по дисциплине «Технология материалов электронной техники» для студентов направления 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника» всех форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Е. Ю. Плотникова. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2024. – 37 с.

В методических указаниях рассматриваются методы исследования параметров полупроводниковых, проводящих и диэлектрических материалов, используемых в микро- и нанoeлектронном производстве. Рассматриваются методики измерения толщины образцов и их элементного состава, рентгеноструктурный анализ и сканирование с помощью АСМ, спектральные характеристики прозрачных структур, изменение электросопротивления в зависимости от условий окружающей среды. Для каждой работы сформированы теоретическое описание исследуемого метода измерения характеристик, блок измерений и расчётные задания.

Предназначены для студентов направления 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника» всех профилей и форм обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле МУ_ТМЭТ.pdf.

Табл. 18. Ил. 11. Библиогр.: 4 назв.

УДК 621.38(07)
ББК 32.85я7

Рецензент – Т. В. Свистова канд. техн. наук, доц. кафедры
твердотельной электроники ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1.

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ОБРАЗЦОВ ТОНКИХ МЕТАЛЛООКСИДНЫХ ПЛЕНОК И ИЗМЕРЕНИЕ ИХ ТОЛЩИНЫ НА МИКРОИНТЕРФЕРОМЕТРЕ МИИ-4

1. Анализ образцов на элементный состав

Метод рентгеновского микроанализа позволяет определить атомный состав различных структур электронной промышленности, в том числе тонких пленок металлооксидов [1]. Электронная бомбардировка позволяет получить как непрерывный рентгеновский спектр тормозного излучения, так и характеристические линии, соответствующие напыленным материалам. Анализируя построенный спектр излучения, можно определить химический элемент - источник излучения, тогда как интенсивность излучения соответствует количеству анализируемого элемента.

В лабораторной работе рентгеновский микроанализ образцов осуществляется на сканирующем электронном микроскопе (РЭМ) JXA-840 в следующем режиме работы: ускоряющее напряжение от 10 до 15 КэВ, диаметр пучка порядка 1 мкм, точность определения элементного состава порядка 0,01 ат. %.

Задание:

Данные предоставляются в виде файлов таблиц (табл. 1). По ним **студент исследует** процентное соотношение элементов в исследуемом образце и строит графическую зависимость содержания элемента (% ат.) от координаты точки измерения на наборе образцов d (см).

Таблица 1

Анализ элементного состава металлооксидных пленок с использованием
РЭМ

№ образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Расположение точки измерения d , см	2	4,5	7	9,5	12	14,5	17	19,5	22
1 элемент, % ат.									
2 элемент, % ат.									
O, % ат.									

2. Исследование толщины металлооксидных пленок

Толщина полупроводниковых и диэлектрических пленок, напыленных на подложки, может быть измерена на микроинтерферометре Линника МИИ-4, который используется для измерения высоты неровностей тонких пленок. Принцип действия прибора основан на явлении интерференции света. Для получения двух наборов длин волн, которые интерферируют, используют разделение исходящего из одной точки источника света светового пучка на наклонной плоскопараллельной пластинке с полупрозрачным делительным покрытием. В результате интерференции в фокальной плоскости окуляра наблюдаются интерференционные полосы. Схема расположения интерференционных полос и их вид на микрофотографии показаны на рис. 1, (а), (б) [2].

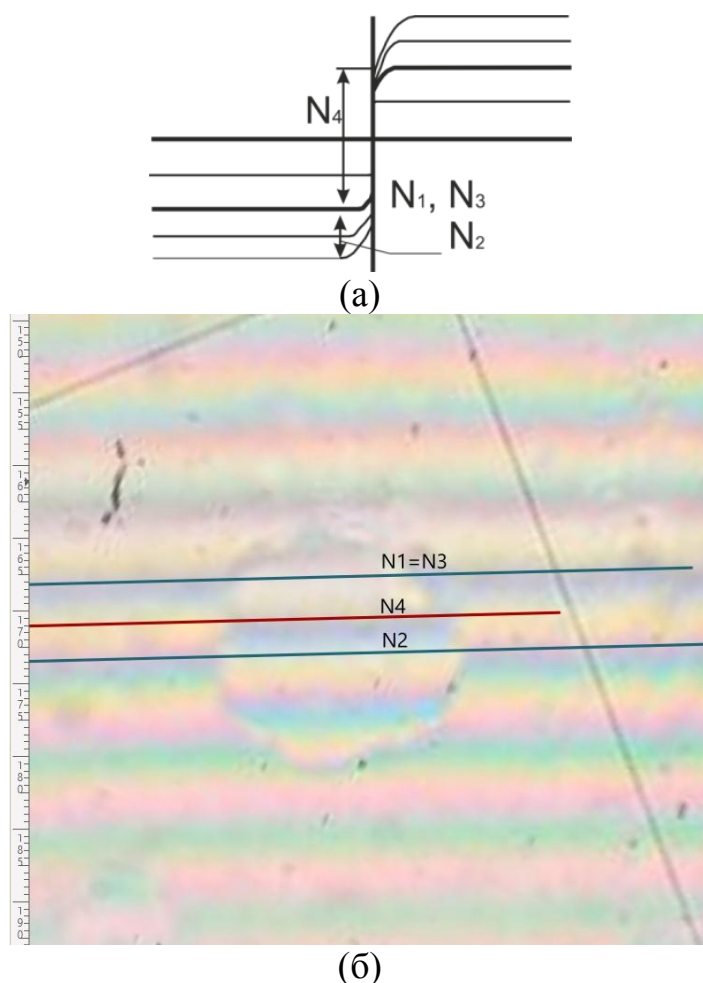


Рис. 1. Изображение поля зрения в МИИ-4: (а) схематичное изображение интерференционных полос, (б) микрофотография образца с интерференционной картиной, отсчитываемыми полосами и вертикальной шкалой для расчёта

При работе в белом свете искривление в одну интерференционную полосу соответствует высоте неровности на исследуемой поверхности, равной 0,27 мкм. Высота неровности H (в мкм) вычисляется по формуле (1)

$$H = 0,27 \frac{N_3 - N_4}{N_1 - N_2} n \text{ (мкм)}, \quad (1)$$

где N_1 - первый отсчет при измерении интервала между полосами;
 N_2 - второй отсчет при измерении интервала между полосами;
 N_3 - первый отсчет при измерении величины изгиба полосы;
 N_4 - второй отсчет при измерении величины изгиба полосы;
 n - число интервалов между полосами.

Если длина волны падающего света $\lambda = 0,55$ мкм, минимальная толщина пленки, измеряемая на приборе, составляет 0,0275 мкм. Если граница между пленкой и подложкой сформирована не четко, точность метода снижается. С помощью интерферометра МИИ-4 можно измерить толщину пленок с погрешностью измеряемых величин от 5 до 10 %.

Задание:

Измерения в лабораторной работе проводятся на аморфных или поликристаллических отожженных образцах тонких металлооксидных пленок при нормальных условиях ($T = 300$ К, $P = 1$ атм.). В качестве предварительной подготовки пленок выполняется очистка в этиловом спирте с последующей сушкой на воздухе и нанесение на пленку резакон из SiC царапины глубиной, достаточной для того, чтобы вскрылась подложка (стекло/Si).

В табл. 2 приводится формула для анализа средней толщины исследуемого образца (2)

$$h_{\text{ср.}} = \frac{\sum_n H}{n} \text{ (мкм)}, \quad (2)$$

где $n = 5$ – количество измерений на образце, шт.,
 H – высота неровности (1), мкм.

Таблица 2

Измерение толщины образцов металлооксидных пленок

№ измерения	1	2	3	4	5
Толщина пленки H , мкм					
$h_{\text{ср.}}$, мкм					

По данным из табл. 2 строится график распределения неравномерности толщины пленки по образцу. Измерения подтверждаются фотографическим материалом, обработанным в редакторе изображений (улучшена контрастность, обрезаны лишние части поля зрения микроскопа, на снимок нанесены линии для расчёта толщины).

По итогам работы делается **вывод** о характеристиках исследуемых пленок.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. РАСЧЁТ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ, ИССЛЕДОВАННЫХ МЕТОДОМ РЕНТГЕНО-ДИФРАКЦИОННОГО АНАЛИЗА (XRD) И МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ (АСМ)

1. Рентгено-дифракционный анализ

На рис. 2 представлена типичная рентгеновская дифрактограмма (дифрактометр Bruker D2 Phaser, XRD) - диаграмма тонкой пленки SnO_2 - ZnO (TZO) (образец имел состав 18,16 ат. % Sn и 18,58 ат. % Zn, исследования проводились после 20 часов отжига при 470 °C).

На диаграмме [2] наблюдаются четко выраженные пики SnO_2 , а также присутствуют незначительно выраженные пики Zn_2SnO_4 и ZnO (отмечены красным, синим и зеленым, соответственно).

Индексы Миллера плоскостей SnO_2 наиболее выраженных пиков на рис. 2 соответствуют кристаллографическим ориентациям из встроенных в XRD-анализатор сопроводительных карт для оксидов олова, цинка и трехкомпонентного химического соединения Zn_2SnO_4 .

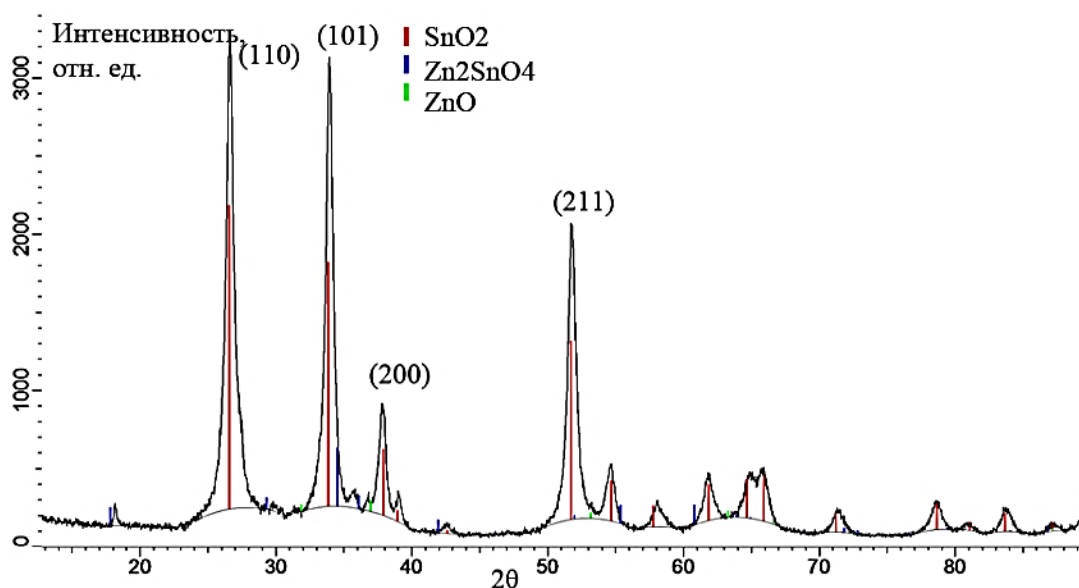


Рис. 2. XRD анализ тонкой пленки TZO. Пики (110), (101), (200) и (211) соответствуют кристаллам SnO_2

В основе индирования (определения индексов отражений) лежит зависимость между величинами межплоскостных расстояний и параметрами элементарной ячейки. Эта связь передается формулами, которые различны для каждой сингонии. Наиболее простой вид формулы имеют в ортогональной системе координат:

$$1 / d^2 = h^2 / a^2 + k^2 / b^2 + l^2 / c^2 \text{ — для ортогональной сингонии,}$$

$$1 / d^2 = (h^2 + k^2) / a^2 + l^2 / c^2 \text{ — для тетрагональной сингонии,}$$

$1 / d^2 = (h^2 + k^2 + l^2) / a^2$ – для кубической сингонии, откуда можно определить длину ребра элементарной ячейки – связь между периодом ячейки и межплоскостным расстоянием (2)

$$a = \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \cdot \frac{d}{n}, \quad \frac{d}{n} = d_{hkl}. \quad (2)$$

Задание:

В практической части работы студент, используя полученные дифрактограммы, изучает, как происходит определение параметров кубической элементарной ячейки по дифрактограмме (рис. 2, 3):

1. По высоте пиков оценивается относительная интенсивность отражений, принимая высоту самого высокого пика за 100 %.

2. Для каждого пика находится угол θ . (На графике указан угол 2θ – между первичным и отраженным лучом!)

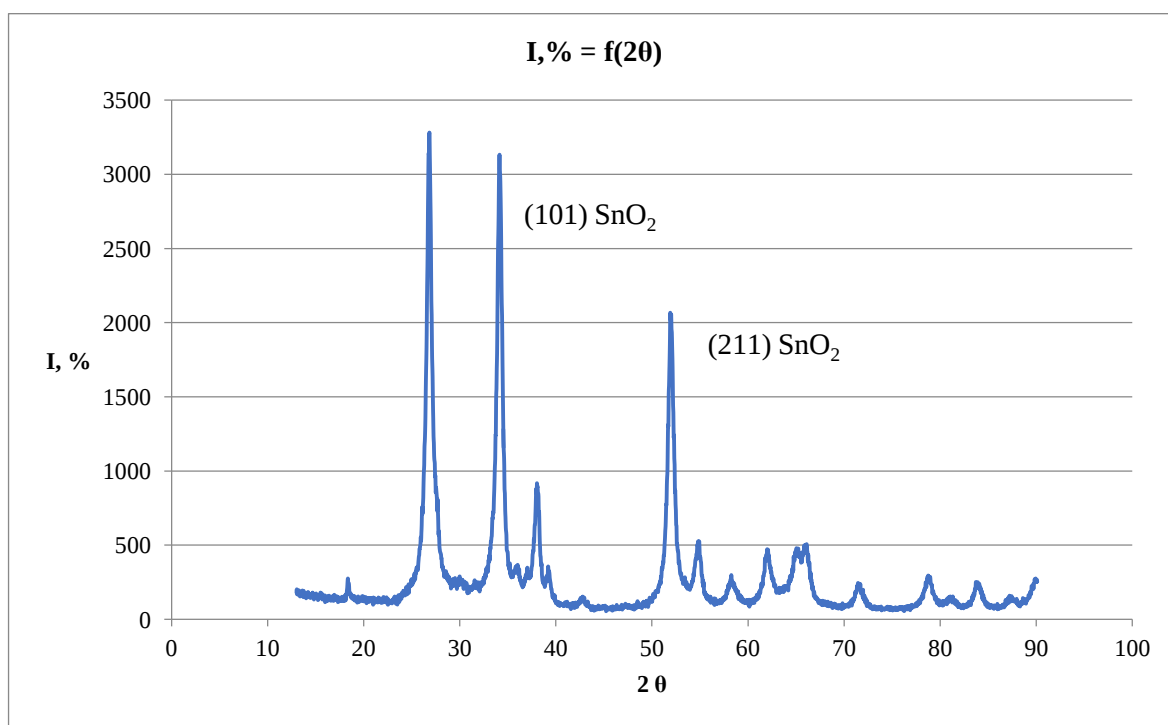


Рис. 3. Пример построения XRD металлооксидного образца для дальнейшего расчёта

3. Рассчитываются межплоскостные расстояния d_{hkl} . На этой стадии, используя соотношения I_{hkl} и d_{hkl} и справочные данные, можно провести идентификацию исследуемого образца.

4. Определяется значение $x = (1/d_1^2) / (1/d_2^2)$. Согласно приведенной выше формуле для кубической сингонии оно отвечает отношению сумм квадратов индексов: $(h_2^2 + k_2^2 + l_2^2) / (h_1^2 + k_1^2 + l_1^2)$.

5. Подбирается множитель, умножение на который превратит полученное число x в рациональное.

Например, $x = (1/d_1^2)/(1/d_2^2) = 1,33$, тогда умножением числа x на 3 получаем дробь $4/3$.

Следовательно, сумма дифракционных индексов отражений $(h_2^2 + k_2^2 + l_2^2) = 4$, а $(h_1^2 + k_1^2 + l_1^2) = 3$. Отсюда подбором получаем, что индексы $h_2 k_2 l_2$ будут 200 (или 002, или 020, что для кубической сингонии равнозначно), а индексы $h_1 k_1 l_1$ – 111.

6. Таким же образом находятся дифракционные индексы всех остальных отражений.

7. По приведенной выше формуле для кубической сингонии определяется параметр элементарной ячейки, находится его среднее значение (и ошибка в определении) – таблица 3.

Используемая во всех дифракционных методах формула Вульфа-Брэгга (3) позволяет охарактеризовать возникновение дифракции

$$2d \cdot \sin(\theta) = n \cdot \lambda, \quad (3)$$

где d – межплоскостное расстояние,

θ – угол между пучком рентгеновских лучей и плоскостью образца,

λ – длина волны рентгеновского излучения,

n – целое число.

Отражение получается в случае, когда углы θ падения и отражения равны друг другу и разность хода между двумя лучами, отраженными от соседних плоскостей, равна $(n \cdot \lambda)$, то есть целому числу длин волн.

Подставив (2) в (3), получим выражение квадратичной формы (4)

$$(\sin(\theta))^2 = \left(\frac{\lambda^2}{4a^2}\right)(h^2 + k^2 + l^2). \quad (4)$$

То есть каждому значению $\sin(\theta)$, а следовательно, и d_{hkl} соответствуют определенные значения индексов интерференции hkl .

Фактически, данная методика позволяет определить размер области когерентного рассеяния.

Таким образом, можно оценить размер кристаллита в поликристалле, или размер зерна в порошке, если последние представляют собой монокристаллы. Размер их может быть определен по формуле Селякова-Шеррера (5)

$$d = \frac{n \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos(\theta)}, \quad (5)$$

где d – длина волны излучения (область когерентного рассеяния, Å),

θ – угол рассеяния,

β – физическое уширение – разность двух значений 2θ на полувысоте пика в радианах ($\beta = 2\theta_2 - 2\theta_1$),

n – коэффициент зависит от формы частицы (обычно близок к 1).

Практически определить размеры ОКР по этой формуле можно в пределах от 1500 – 2000 Å до 15 – 20 Å, причем в различных кристаллографических направлениях.

Используя линии с разными индексами, можно оценить форму кристаллитов, сравнивая получившиеся размеры вдоль выбранного направления (табл. 4, 5).

Таблица 3

Результаты качественного рентгенофазного анализа

Наименование кристаллической фазы, химическая формула соединения	Индекс карточки образца	Сингония	Параметры элементарной ячейки	Плотность соединения

Таблица 4

XRD данные из спектра образца для графического расчёта

2θ	$I, \%$	Glass (стекло) на стекле нет пиков интенсивности
// в столбцы вносятся данные из карты измерения XRD образца		

Таблица 5

Результаты количественного расчёта параметров кристаллитов из диаграммы рентгенофазного анализа

	2θ	$I, \%$	$d, \text{нм}$	n	$\lambda, \text{нм}$	β	$\cos \theta$
1				0,96	1,54		1
2							
3							

Для исследуемой рентгенограммы образца размер зерна d оценивается по формуле (5).

2. Исследование морфологии поверхности образцов [2]

Для исследования поверхности тонких пленок на кафедре ТТЭ используется атомно-силовой микроскоп FemtoScan - 001. Принцип действия атомного силового микроскопа (АСМ) основан на использовании сил атомных связей, действующих между атомами вещества. На малых расстояниях между двумя атомами действуют силы отталкивания, а на больших – силы притяжения. Аналогичные силы взаимодействия существуют между любыми сближающимися телами. В сканирующем

атомном силовом микроскопе это исследуемая поверхность и скользящее над нею острие.

В качестве зонда используется игла с площадью острия в один или несколько атомов, закрепленная на кантилере, который плавно скользит над поверхностью образца. На выступающем конце кантилевера (над шипом) расположена зеркальная площадка, на которую падает и от которой отражается луч лазера. Когда зонд опускается и поднимается на неровностях поверхности, отраженный луч отклоняется, и это отклонение регистрируется фотодетектором, а сила, с которой шип притягивается к близлежащим атомам – пьезодатчиком. Система обратной связи обеспечивает постоянную величину силу взаимодействия между микрозондом и поверхностью образца.

В результате строится рельеф поверхности образца (рис. 4) в режиме реального времени. Разрешающая способность данного метода составляет примерно 0,1 - 1 нм по горизонтали и 0,01 нм по вертикали. Визуализация производится средствами компьютерной графики в виде трехмерных 3D и двухмерных (2D) изображений. Точность подведения иглы 2 Å. Погрешность измерений составляет значения до 2,5 %.

Анализ параметров исследуемых образцов проводился в модуле обработки изображений Image Analysis 2.1.2, входящем в пакет управления атомно-силовым микроскопом FemtoScan – 001. Снятое АСМ плоское (2D) изображение поверхности исследуемых пленок было перестроено в объемные модели (рис. 5) и в профили распределения высоты.

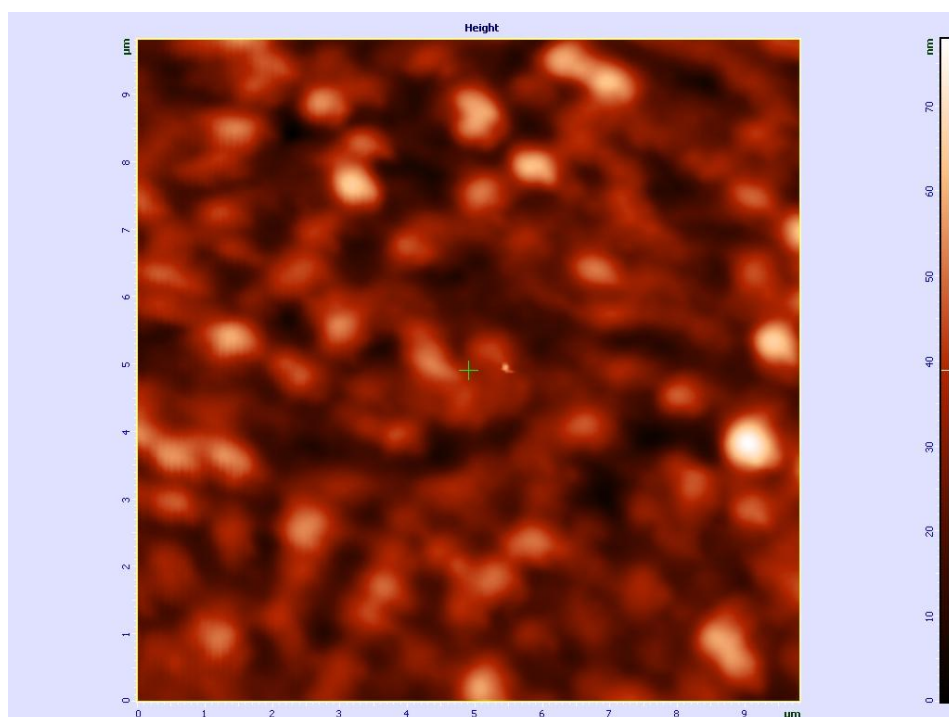


Рис. 4. Рельеф поверхности образца металлооксидной пленки в 2D-режиме тонкой

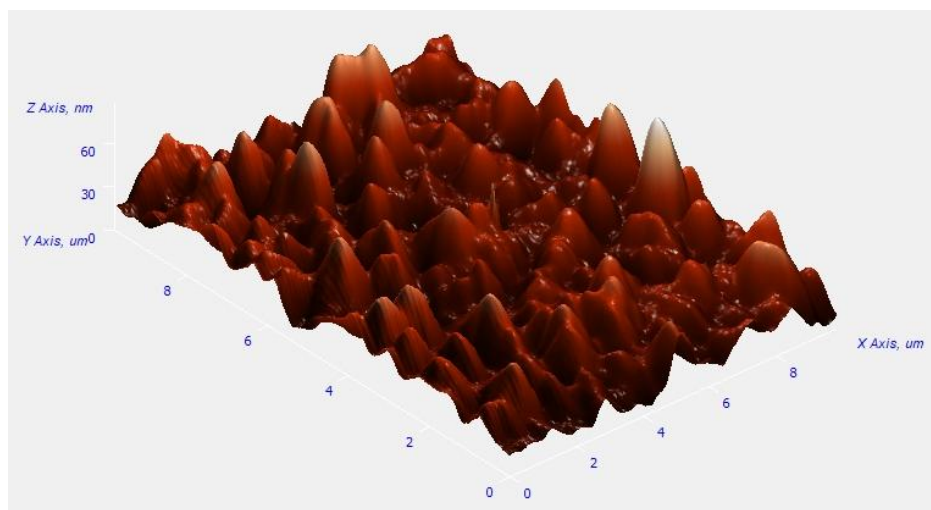


Рис. 5. Обработанная в программном комплексе Image Analysis 2.1.2 структура рельефа поверхности тонкой металлооксидной пленки

Задание:

В практической части работы студент по профилям распределения высоты образцов в программе Image Analysis 2.1.2 рассчитывает статистические параметры поверхностей пленок:

- 1) *Max* (максимальная высота поверхности)
- 2) *Min* (минимальная высота поверхности)
- 3) *Peak-to-peak, Ry* (размах высот)
- 4) *Ten point height, Rz* (средняя шероховатость поверхности по выбранным 5 максимальным высотам и впадинам)
- 5) *Average* (среднее значение шероховатости)
- 6) *Surface skewness, Rsk* (несимметричность распределения)

Из величины средней шероховатости по выборке *Ry* можно оценить среднее значение перепада высот. Если брать среднее значение шероховатости по всему сечению, величина не учитывает возможные погрешности напыления образцов.

При анализе размера зерна по профилю распределения высоты визуально можно оценить размер зерен, находящихся на поверхности образца.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3. ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРОВ ПРОПУСКАНИЯ И ПОГЛОЩЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ МЕТАЛЛООКСИДНЫХ ОБРАЗЦОВ МЕТОДАМИ СПЕКТРОМЕТРИИ

Для многих разработок в области микро- и оптоэлектроники требуется получение образцов прозрачных в видимом диапазоне оптического спектра [2].

Оптические свойства синтезированных пленок, исследуемых в данной лабораторной работе, измеряются на спектрофотометре СПЕКС ССП-715-М. Измерение оптического пропускания и поглощения пленок и последующий анализ спектров позволяют оценить прозрачность и ширину запрещенной зоны металлооксида.

На исследуемых пленках измеряется зависимость пропускания T , % от длины волны λ , нм. По этой зависимости определяются порог пропускания и прозрачность плёночных образцов.

На рис. 6 представлено распределение коэффициента пропускания образцов пленок $TiO_2 - SiO_2$ с разными концентрациями титана и кремния. Образцы пленок достаточно прозрачны в видимом диапазоне электромагнитного спектра (T от 60 до 80 % в интервале длин волн видимого света $\lambda = 450 \div 800$ нм).

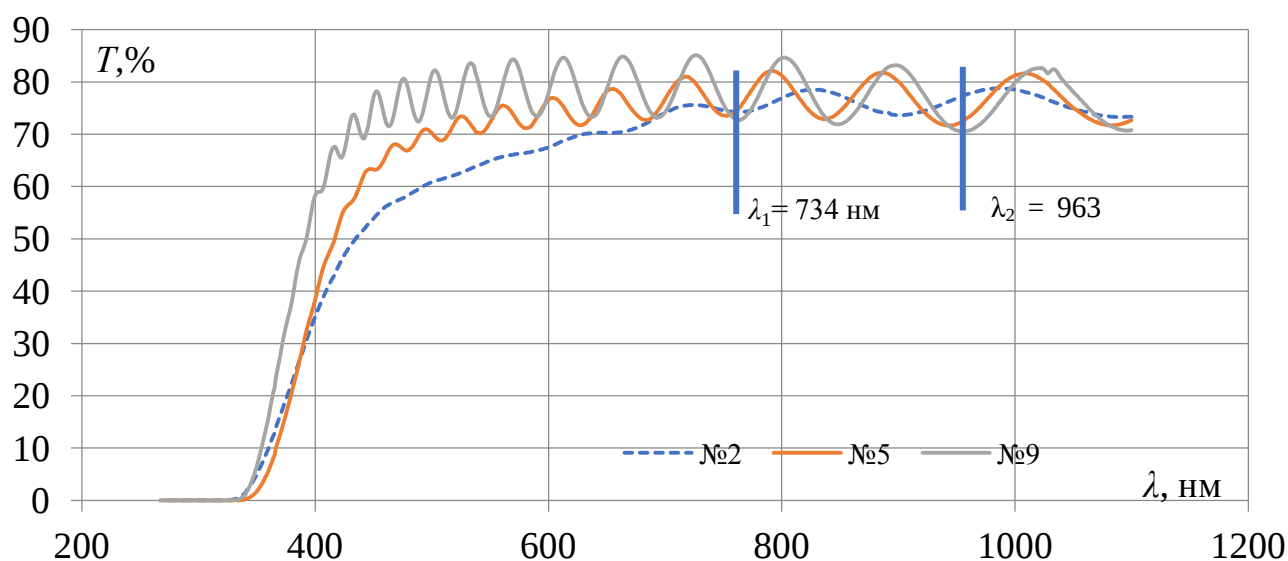


Рис. 6. Коэффициенты пропускания тонких металлооксидных пленок различных образцов

Для тонких пленок подзатворного диэлектрика $TiO_2 - SiO_2$ из экстремумов на рис. 6 рассчитаны значения диэлектрической проницаемости ε (табл. 6) и коэффициента преломления n . Для расчета величины диэлектрической проницаемости ε используется зависимость коэффициента пропускания от длины волны, применяемая при контроле параметров эпитаксиальных слоев оптическим методом. Толщина исследуемой пленки d

(мкм) измерена ранее в лабораторной работе 1. Принимаем, что $\sin^2(\theta) = 0$. Из рис. 6 можно выбрать длины волн двух экстремумов (λ_1 и λ_2), отстоящих на m целых значений длин волн друг от друга (6)

$$d = \frac{m}{2\sqrt{(n^2 - (\sin \theta)^2) \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}}. \quad (6)$$

Далее преобразовываем формулу (6) с учетом того, что пленки не обладают магнитными свойствами, а коэффициент преломления $n = \sqrt{\varepsilon}$. По формуле (7) рассчитываем величину диэлектрической проницаемости ε

$$\varepsilon = \left(\frac{m}{2d \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)} \right)^2, \quad (7)$$

для каждого из образцов тонких пленок.

Величина диэлектрической проницаемости пленки близка к значениям, используемым в макетных образцах ТТФТ ($\varepsilon = 16$ при емкости подзатворного диэлектрика $C_g = 0,7$ мФ/м²).

Рассчитана требуемая величина диэлектрической проницаемости ε при условии известных емкости C_g (мФ/м²) и толщины d (нм) рассчитывается как (8)

$$\varepsilon_d = \left(C_g / \square \right) \times \frac{d}{\varepsilon_0}, \quad (8)$$

где диэлектрическая проницаемость вакуума $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ Ф/м.

Таблица 6

Диэлектрическая проницаемость тонких пленок

Образец	λ_1 , мкм	λ_2 , мкм	d , мкм	m	ε	n

При анализе образца на спектрофотометре измеряются коэффициент пропускания (рассмотрен выше) и коэффициент поглощения (α , см⁻¹).

По закону Бугера – Ламберта – Бера, зная толщину исследуемой пленки, пересчитываем коэффициент пропускания T в коэффициент поглощения α (9)

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{1}{T}, \quad (9)$$

и проверяем, насколько расчётные значения отличаются от измеренных на спектрофотометре.

С помощью расчёта зависимости α от энергии электромагнитного излучения (энергия $E = h\nu$, эВ). Для перевода длины волны светового потока в энергию используется стандартная формула (10)

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}. \quad (10)$$

Поскольку длина волны в измерениях приводится в нанометрах, для расчёта энергии в формулу вводится множитель 10^9 (рис. 7).

Таблица 7

Физические константы, используемые при расчёте энергии падающего
электромагнитного излучения

Формула: $=F\$3*\$G\$3/B3/\$H\$3*1000000000$

	B	C	D	E	F	G	H	I
	ZnO на SiO ₂ спрей-пиролиз							
	λ, нм	α, отн. ед.	T, %	E, эВ	h, Дж·с	c, м/с	q, кл	α ² (E)
	190,00	0,95	11,30	00	6,63E-34	299792458	1,60E-19	0
	191,00	1,14	7,28	6,49				1
	192,00	1,28	5,29	6,46				1

The graph plots the absorption coefficient α in cm^{-1} against the photon energy $h\nu$ in eV. The y-axis is labeled α, cm^{-1} and ranges from 0 to 100,000. The x-axis is labeled $h\nu, \text{eV}$ and ranges from 1 to 4. Three data series are shown: №2 (dashed blue line), №5 (solid orange line), and №9 (solid grey line). All three series show a sharp increase in absorption starting around 3.5 eV, with sample №9 reaching the highest values above 3.7 eV.

14

Данные вносятся в табл. 8.

Таблица 8

Ширина запрещенной зоны E_g , оцененная из падения касательной коэффициента поглощения на ось энергий

№ образца	E_g , эВ

Для более глубокого анализа параметров образцов коэффициент поглощения α пересчитывается в координатах $\alpha^2(h\nu)$ и $\alpha^{1/2}(h\nu)$. Определяется в каких координатах кривые лучше спрямляются. Если спрямление сильнее в пересчете $\alpha^2(h\nu)$, то пленка проявляет свойства прямозонного полупроводника. При спрямлении в $\alpha^{1/2}(h\nu)$ – непрямоzonный полупроводник.

Если ширина запрещенной зоны образца больше 3 эВ, то есть энергии, соответствующей красной границе пропускания света. Следовательно, все исследуемые образцы будут прозрачными в видимом свете.

Задание:

В лабораторной работе студент с использованием спектрофотометра СПЕКС ССП-715-М снимает зависимости коэффициентов пропускания T (%) и α (отн. ед.) от длины волны λ (нм).

Файл с полученными данными перестраивается в стандартную таблицу и графики $T(\lambda)$ и $\alpha_{\text{эксперим}}(E, \text{эВ})$.

Далее коэффициент пропускания T пересчитывается в коэффициент поглощения $\alpha_{\text{расчет}}$.

По формуле (6) рассчитывается толщина пленки. Она сравнивается со значением, полученным на микроинтерферометре МИИ-4.

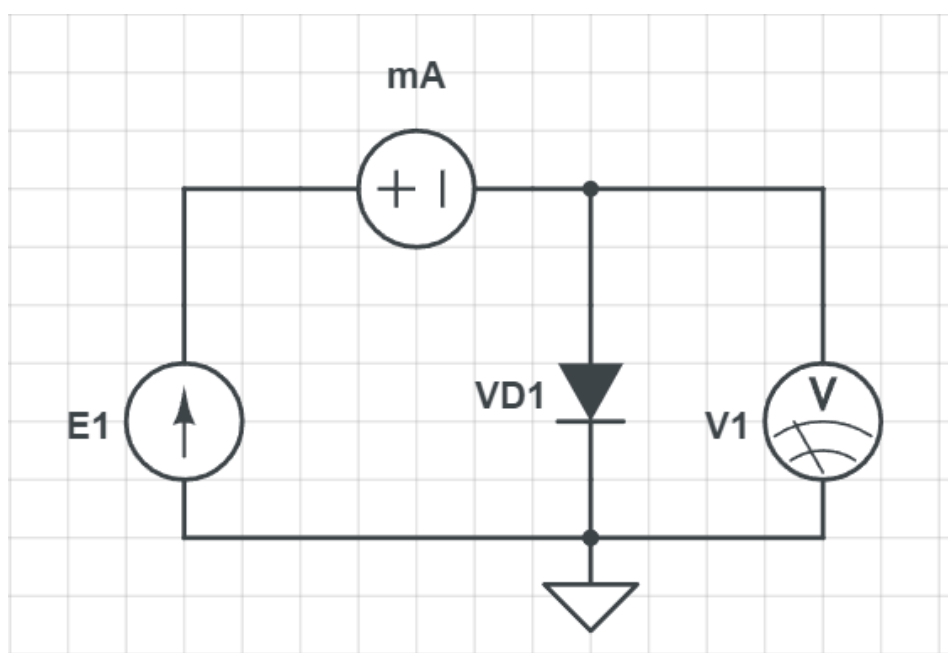
По формуле (7) рассчитывается диэлектрическая проницаемость пленки. Она сравнивается с измеренным значением (формула (8)).

Далее (табл. 7) определяется значение величины ширины запрещенной зоны. Проводятся расчёты $\alpha^2(h\nu)$ и $\alpha^{1/2}(h\nu)$, позволяющие определить характер расположения зон в исследуемом образце.

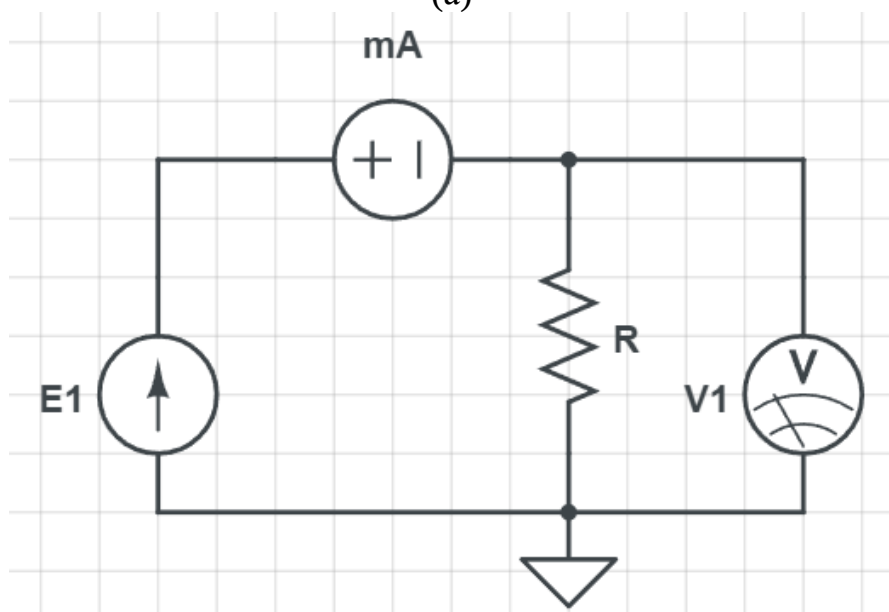
Делается вывод о характеристиках образца.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4.
ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКИХ
ПРОВОДЯЩИХ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНОК
С ПОМОЩЬЮ ЛАБОРАТОРНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА
LESO3

В лабораторной работе студентам требуется с использованием соединительных проводов собрать схему для исследования ВАХ резисторов и диодов (диод подключен в прямом направлении) (рис. 9). Схема монтируется на основе лабораторного измерительного стенда Leso-3 (рис. 10).



(a)



(б)

Рис. 9. Схема исследования ВАХ диодов (а) и резисторов (б)

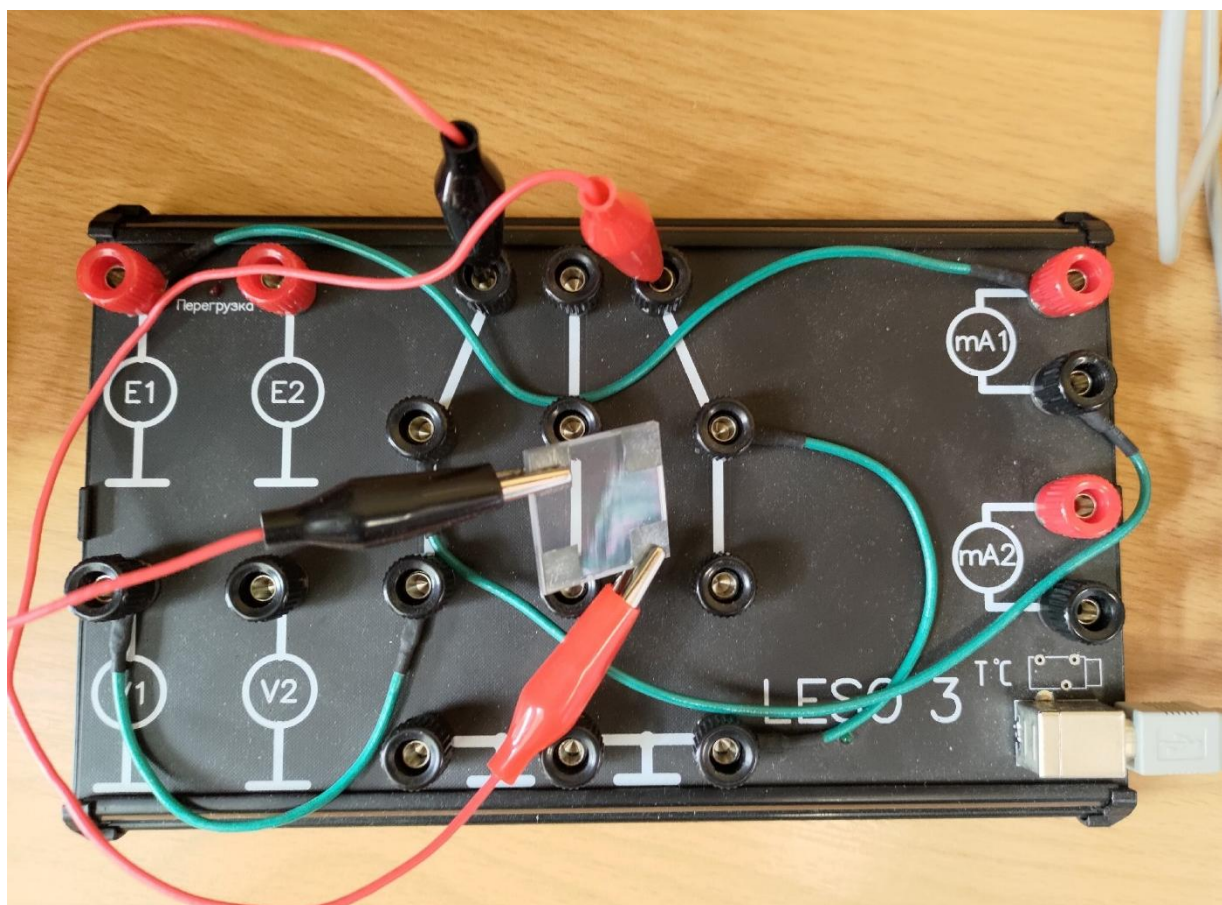


Рис. 10. Вид собранной на стенде схемы

Задание:

1. Установить диапазон регулирования источника **E1** (-10 +10) В. Выбрать на графике по вертикальной оси **mA1**, диапазон установить (-0,1 ... +0,1) мА; диапазон подбирается таким образом, чтобы характеристика исследуемой пленки была «читаема». Выбрать на графике по горизонтальной оси **V1**, диапазон (-11 +11) В.

Подключить металлооксидную пленку клеммами к стенду Leso-3 (рис. 10). Снять вольтамперные характеристики исследуемого образца. Для этого плавно поворачивать ручку управления источника **E1** сначала вправо до упора, затем влево до упора. Плавно вернуть ручку **E1** в положение «0».

Построенная характеристика экстрагируется в табличный файл для дальнейшей обработки (табл. 9).

Из полученной выборки данных методом аппроксимации выбрать средние значения тока для напряжений -10, -9, ..., 0, ..., 9, 10 В и внести их в таблицу.

С использованием инструментов редактора таблиц построить график ВАХ для измеренной пленки (из таблицы, сохраненной при измерениях на Leso-3) и ВАХ образца по выборке токов от напряжений (табл. 9); на второй ВАХ добавьте кривую аппроксимации. Проанализируйте построенную характеристику, сделайте выводы по свойствам исследуемой пленки.

Таблица 9

ВАХ исследуемого образца без приложения внешнего воздействия

U, В	$I_{измер}$ мА
-10	
-9	
-8	
-7	
-6	
-5	
-4	
-3	
-2	
-1	
0	
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	

На рис. 11 приведен пример ВАХ тонкопленочного образца $ZnO-SnO_2$. В области вблизи 0 присутствуют эффекты, характерные диодам.

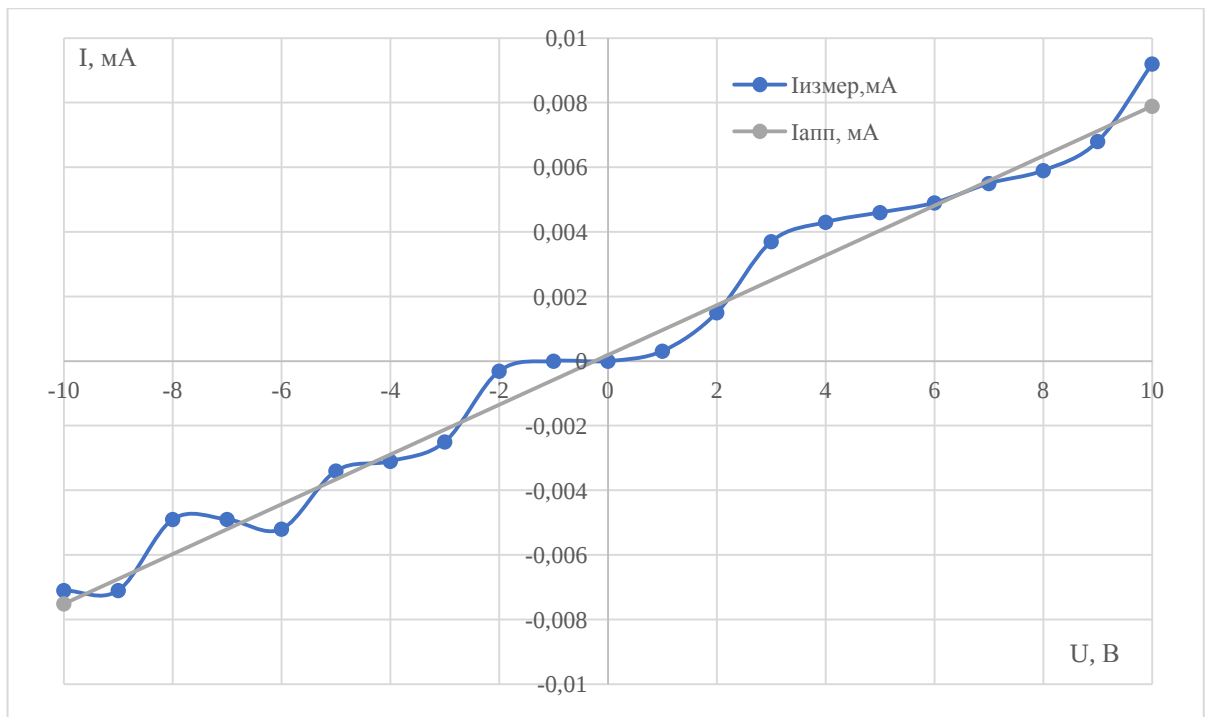


Рис. 11. ВАХ тонкой пленки *TZO*, нанесенной на кварцевую подложку

ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ»

В таблице 10 приведен набор тем для подготовки студентами докладов на практические работы по технологии материалов электронной техники. На каждую практическую работу студент выбирает тему из списка (исходная статья должна занимать не менее 1 страницы в источнике [4], из которого берется информация для дальнейшей обработки). Если выбрана объемная тема (более 3 листов), её можно представить на отчёт на двух практических работах.

Доклад оформляется в текстовом редакторе по правилам оформления, принятым в ВУЗе. К докладу должна прилагаться презентация, содержащая вспомогательный иллюстративный материал (графики, формулы, таблицы, иллюстрации и так далее).

Таблица 10

Список индивидуальных заданий для подготовки докладов

№	Тема:	ФИО гр. 1	ФИО гр. 2
1	59 Inorganic Perovskite Oxides Tatsumi Ishihara 1405		
2	59.1 Typical Properties of Perovskite Oxides 1409		
3	59.2 Photocatalytic Activity 1411		
4	59.3 Application for Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs) 1413		
5	58 Transparent Conductive Oxides 1391		
6	58.1 Overview 1391		
7	58.2 Materials Design for TCOs 1395		
8	58.3 New Approach to Explore Candidate Materials 1402		
9	59.4 Oxygen Separating Membrane 1418		
10	57 Thermoelectric Materials 1379		
11	57.1 Overview of the Field 1380		
12	57.2 Semiconductors as Thermoelectric Materials 1381		
13	57.3 New Concepts in Thermoelectric Materials Design 1385		
14	57.4 Summary and Future Outlook 1389		
15	56 Metamaterials Vassili Fedotov 1351		
16	56.1 Bulk Metamaterials 1351		
17	56.2 Planar Metamaterials 1365		
18	55 Materials for Terahertz Engineering 1339		
19	55.1 Overview 1339		
20	55.2 Terahertz Sources 1343		
21	55.3 Terahertz Detectors 1345		
22	55.4 Terahertz Components 1346		
23	54 Organic Solar Cells 1329		
24	54.1 History 1330		
25	54.2 Excitons 1331		
26	54.3 Donor–Acceptor Sensitization 1332		
27	54.4 Exciton Diffusion 1332		
28	54.5 Blended Junctions 1333		
29	54.6 Route Formation 1334		
30	54.7 π – π Stacking 1335		
31	54.8 HOMO–LUMO Gap 1335		
32	54.9 Tandem Cells 1336		

№	Тема:	ФИО гр. 1	ФИО гр. 2
33	53 Packaging Materials 1311		
34	53.1 Package Applications 1312		
35	53.2 The Materials Challenge of Electronic Packaging 1313		
36	53.3 Materials Coefficient of Thermal Expansion 1315		
37	53.4 Wirebond Materials 1315		
38	53.5 Solder Interconnects 1317		
39	53.6 Substrates 1322		
40	53.7 Underfill and Encapsulants 1323		
41	53.8 Electrically Conductive Adhesives (ECAs) 1324		
42	53.9 Thermal Issues 1326		
43	52 Organic Materials for Chemical Sensing 1281		
44	52.1 Analyte Requirements 1282		
45	52.2 Brief Review of Inorganic Materials 1283		
46	52.3 Macrocyclic Compounds for Sensing 1286		
47	52.4 Sensing with Phthalocyanine and Porphyrin 1291		
48	52.5 Polymeric Materials 1297		
49	52.6 Cavitand Molecules 1303		
50	52.7 Concluding Remarks 1305		
51	51 Molecular Electronics 1257		
52	51.1 Electrically Conductive Organic Compounds 1258		
53	51.2 Materials 1261		
54	51.3 Plastic Electronics 1263		
55	51.4 Molecular-Scale Electronics 1266		
56	51.5 DNA Electronics 1274		
57	50 High-Temperature Superconductors 1225		
58	50.1 The Superconducting State 1228		
59	50.2 Cuprate High-Tc Superconductors: An Overview 1234		
60	50.3 Physical Properties of Cuprate Superconductors 1239		
61	50.4 Superconducting Films 1244		
62	50.5 The Special Case of MgB ₂ 1245		
63	50.6 Iron-Based Superconductors 1248		
64	49 Magnetic Information-Storage Materials 1185		
65	49.1 Magnetic Recording Technology 1186		
66	49.2 Magnetic Random-Access Memory 1215		
67	49.3 Extraordinary Magnetoresistance (EMR) 1220		
68	48 Graphene 1173		
69	48.1 Graphene Synthesis 1174		
70	48.2 Band Structure and Electronic Applications 1176		
71	48.3 Characterization of Graphene Material 1178		
72	48.4 Photonic Applications 1180		
73	47 Carbon Nanotubes and Bucky Materials 1163		
74	47.1 Carbon Nanotubes 1163		
75	47.2 Bucky Materials 1170		
76	46 Phase-Change Memory Materials 1149		
77	46.1 Structure of Ge-Sb-Te Phase-Change Alloys 1150		
78	46.2 Mechanism of the Phase-Change Process 1156		
79	46.3 Present Applications and Future Trends 1158		
80	45 Photoconductors for X-Ray Image Detectors 1125		
81	45.1 X-Ray Photoconductors 1127		
82	45.2 Dark Current Limitations 1136		

№	Тема:	ФИО гр. 1	ФИО гр. 2
83	45.3 Metrics of Detector Performance 1139		
84	44 Disordered Semiconductors on Mechanically Flexible Substrates for Large-Area Electronics 1111		
85	44.1 a-Si:H TFTs on Flexible Substrates 1112		
86	44.2 Field-Effect Transport in Amorphous Films 1112		
87	44.3 Electronic Transport Under Mechanical Stress 1118		
88	43 Solar Cells and Photovoltaics 1097		
89	43.1 Figures of Merit for Solar Cells 1098		
90	43.2 Crystalline Silicon 1100		
91	43.3 Amorphous Silicon 1102		
92	43.4 GaAs Solar Cells 1102		
93	43.5 CdTe Thin-Film Solar Cells 1104		
94	43.6 CuInGaSe ₂ (CIGS ₂) Thin-Film Solar Cells 1105		
95	43.7 Excitonic PV 1107		
96	42 Optical Nonlinearity in Photonic Glasses 1081		
97	42.1 Third-Order Nonlinearity in Homogeneous Glass 1083		
98	42.2 Second-Order Nonlinearity in Poled Glass 1088		
99	42.3 Particle-Embedded Systems 1089		
100	42.4 Photoinduced Phenomena 1090		
101	41 Glasses for Photonic Integration 1059		
102	41.1 Main Attributes of Glasses as Photonic Materials 1061		
103	41.2 Glasses for Integrated Optics 1068		
104	41.3 Laser Glasses for Integrated Light Sources 1071		
105	40 Quantum Wells, Superlattices, and Band-Gap Engineering 1037		
106	40.1 Principles of Bandgap Engineering and Quantum Confinement 1038		
107	40.2 Optoelectronic Properties of Quantum-Confined Structures 1040		
108	40.3 Emitters 1047		
109	40.4 Detectors 1050		
110	40.5 Modulators 1052		
111	40.6 Quantum Dots and Nanowires 1053		
112	39 Nano-Engineered Tunable Photonic Crystals 1013		
113	39.1 PC Overview 1014		
114	39.2 Traditional Fabrication Methodologies for Static PCs 1017		
115	39.3 Tunable PCs 1027		
116	39.4 Summary and Conclusions 1030		
117	38 Luminescent Materials 997		
118	38.1 Luminescent Centres 999		
119	38.2 Interaction with the Lattice 1001		
120	38.3 Thermally Stimulated Luminescence 1003		
121	38.4 Optically (Photo-)Stimulated Luminescence 1004		
122	38.5 Experimental Techniques – Photoluminescence 1005		
123	38.6 Applications 1006		
124	38.7 Representative Phosphors 1011		
125	37 Organic Photoconductors 967		

№	Тема:	ФИО гр. 1	ФИО гр. 2
126	37.1 Chester Carlson and Xerography 968		
127	37.2 Operational Considerations and Critical Materials Properties 970		
128	37.3 OPC Characterization 978		
129	37.4 OPC Architecture and Composition 980		
130	37.5 Photoreceptor Fabrication 990		
131	36 Liquid Crystals 933		
132	36.1 Introduction to Liquid Crystals 933		
133	36.2 The Basic Physics of Liquid Crystals 940		
134	36.3 Liquid-Crystal Devices 947		
135	36.4 Materials for Displays 956		
136	35 Optoelectronic Devices and Materials 897		
137	35.1 Introduction to Optoelectronic Devices 898		
138	35.2 Light-Emitting Diodes and Semiconductor Lasers 900		
139	35.3 Single- and Multimode Lasers 913		
140	35.4 Optical Amplifiers 922		
141	35.5 Modulators 923		
142	35.6 Photodetectors 927		
143	34 II-VI Narrow Bandgap Semiconductors: Optoelectronics 867		
144	34.1 Overview 867		
145	34.2 Applications and Sensor Design 870		
146	34.3 Photoconductive Detectors in HgCdTe 871		
147	34.4 Sprite Detectors 872		
148	34.5 Introduction to Photovoltaic Devices in HgCdTe 873		
149	34.6 Manufacturing Technology for Photodiode Arrays 879		
150	34.7 Advanced HgCdTe Technologies 886		
151	34.8 Emission Devices in II-VI Semiconductors 892		
152	34.9 Potential for Reduced Dimensionality in HgTe-CdTe 893		
153	33 II-IV Semiconductors for Optoelectronics: CdS, CdSe, CdTe 853		
154	33.1 Background 853		
155	33.2 Solar Cells 853		
156	33.3 Radiation Detectors 858		
157	32 Electron Transport Within III-V Nitride Semiconductors 829		
158	32.1 Electron Transport Within Semiconductors and the Monte Carlo Simulation Approach 830		
159	32.2 Steady-State and Transient Electron Transport Within Bulk Wurtzite GaN, AlN, and InN 834		
160	32.3 Electron Transport Within III-V Nitride Semiconductors 845		
161	31 Group III Nitrides 743		
162	31.1 Crystal Structures of Nitrides 745		
163	31.2 Lattice Parameters of Nitrides 746		
164	31.3 Mechanical Properties of Nitrides 748		
165	31.4 Thermal Properties of Nitrides 752		
166	31.5 Electrical Properties of Nitrides 757		
167	31.6 Optical Properties of Nitrides 769		
168	31.7 Properties of Nitride Alloys 782		

№	Тема:	ФИО гр. 1	ФИО гр. 2
169	31.8 Doped GaN 786		
170	31.9 Defects in GaN 789		
171	31.10 GaN-Based Nanostructures 794		
172	30 III-V Ternary and Quaternary Compounds 725		
173	30.1 Introduction to III–V Ternary and Quaternary Compounds 726		
174	30.2 Interpolation Scheme 726		
175	30.3 Structural Parameters 727		
176	30.4 Mechanical, Elastic and Lattice Vibronic Properties 729		
177	30.5 Thermal Properties 731		
178	30.6 Energy Band Parameters 733		
179	30.7 Optical Properties 737		
180	30.8 Carrier Transport Properties 739		
181	29 Thick Films 707		
182	29.1 Thick Film Processing 708		
183	29.2 Substrates 710		
184	29.3 Thick Film Materials 711		
185	29.4 Components and Assembly 714		
186	29.5 Sensors 717		
187	28 Thin Films 645		
188	28.1 Deposition Methods 647		
189	28.2 Structure 669		
190	28.3 Properties 680		
191	27 Dielectric Materials for Microelectronics 615		
192	27.1 Overview 615		
193	27.2 Gate Dielectrics 620		
194	27.3 Isolation Dielectrics 635		
195	27.4 Capacitor Dielectrics 636		
196	27.5 Interconnect Dielectrics 639		
197	26 Ferroelectric Materials 589		
198	26.1 Definitions and Background 589		
199	26.2 Ferroelectric Materials 593		
200	26.3 Ferroelectric Materials Fabrication Technology 600		
201	26.4 Ferroelectric Applications 607		
202	25 Amorphous and Microcrystalline Silicon 573		
203	25.1 Reactions in SiH ₄ and SiH ₄ =H ₂ Plasmas 574		
204	25.2 Film Growth on a Surface 575		
205	25.3 Defect Density Determination for a-Si:H and μ c-Si:H 580		
206	25.4 Device Applications 582		
207	25.5 Recent Progress in Material Issues Related to Thin-Film Silicon Solar Cells 583		
208	24 Amorphous Semiconductors: Structure, Optical, and Electrical Properties 557		
209	24.1 Electronic States 557		
210	24.2 Structural Properties 560		
211	24.3 Optical Properties 561		
212	24.4 Electrical Properties 565		
213	24.5 Light-Induced Phenomena 567		

№	Тема:	ФИО гр. 1	ФИО гр. 2
214	24.6 Nanosized Amorphous Structure 569		
215	23 Temperature-Insensitive Band-Gap III-V Semiconductors: Tl-III-V and III-V-Bi 543		
216	23.1 Tl-III-V Alloy Semiconductors 544		
217	23.2 III-V-Bi Alloy Semiconductors 550		
218	22 Silicon-Germanium: Properties, Growth and Applications 523		
219	22.1 Physical Properties of Silicon-Germanium 524		
220	22.2 Optical Properties of SiGe 530		
221	22.3 Growth of Silicon-Germanium 534		
222	22.4 Polycrystalline Silicon-Germanium 537		
223	21 Single-Crystal Silicon: Electrical and Optical Properties 485		
224	21.1 Silicon Basics 485		
225	21.2 Electrical Properties 495		
226	21.3 Optical Properties 515		
227	20 Electrical Characterization of Semiconductor Materials and Devices 453		
228	20.1 Resistivity 454		
229	20.2 Hall Effect 462		
230	20.3 Capacitance–Voltage Measurements 464		
231	20.4 Current–Voltage Measurements 470		
232	20.5 Charge Pumping 472		
233	20.6 Low-Frequency Noise 473		
234	20.7 Deep-Level Transient Spectroscopy 477		
235	19 Thermal Properties and Thermal Analysis: Fundamentals, Experimental Techniques and Applications 425		
236	19.1 Heat Capacity 426		
237	19.2 Thermal Conductivity 431		
238	19.3 Thermal Expansion 436		
239	19.4 Enthalpic Thermal Properties 438		
240	19.5 Temperature-Modulated DSC (TMDSC) 446		
241	18 Surface Chemical Analysis 413		
242	18.1 Electron Spectroscopy 414		
243	18.2 Glow-Discharge Spectroscopies (GDOES and GDMS) 416		
244	18.3 Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS) 417		
245	17 Structural Characterization 385		
246	17.1 Radiation-Material Interactions 386		
247	17.2 Particle-Material Interactions 387		
248	17.3 X-ray Diffraction 390		
249	17.4 Optics, Imaging and Electron Diffraction 393		
250	17.5 Characterizing Functional Activity 403		
251	17.6 Sample Preparation 404		
252	17.7 Case Studies – Complementary Characterization of Electronic and Optoelectronic Materials 406		
253	16 Wide-Bandgap II-VI Semiconductors: Growth and Properties 365		
254	16.1 Crystal Properties 367		
255	16.2 Epitaxial Growth 371		

№	Тема:	ФИО гр. 1	ФИО гр. 2
256	16.3 Bulk Crystal Growth 375		
257	15 Narrow Bandgap II-VI Semiconductors: Growth 343		
258	15.1 Bulk Growth Techniques 344		
259	15.2 Liquid Phase Epitaxy (LPE) 349		
260	15.3 Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy (MOVPE) 353		
261	15.4 Molecular Beam Epitaxy (MBE) 358		
262	15.5 Alternatives to MCT 361		
263	14 Epitaxial Crystal Growth: Methods and Materials 309		
264	14.1 Liquid-Phase Epitaxy (LPE) 309		
265	14.2 Metal Organic Chemical Vapor Deposition 319		
266	14.3 Molecular Beam Epitaxy (MBE) 329		
267	13 Single-Crystal Silicon: Growth and Properties 293		
268	13.1 Overview 294		
269	13.2 Starting Materials 295		
270	13.3 Single-Crystal Growth 296		
271	13.4 New Crystal Growth Methods 304		
272	12 Bulk Crystal Growth: Methods and Materials 269		
273	12.1 Background 269		
274	12.2 History 270		
275	12.3 Techniques 271		
276	12.4 Materials Grown 278		
277	11 Ionic Conduction and Applications 247		
278	11.1 Conduction in Ionic Solids 248		
279	11.2 Fast Ion Conduction 251		
280	11.3 Mixed Ionic–Electronic Conduction 256		
281	11.4 Applications 258		
282	11.5 Future Trends 262		
283	10 Dielectric Response 219		
284	10.1 Definition of Dielectric Response 220		
285	10.2 Frequency-Dependent Linear Responses 222		
286	10.3 Information Contained in the Relaxation Response 228		
287	10.4 Charge Transport 240		
288	10.5 Data Presentation 243		
289	10.6 A Few Final Comments 243		
290	9 Charge Transport in Disordered Materials 193		
291	9.1 General Remarks on Charge Transport in Disordered Materials 195		
292	9.2 Charge Transport in Disordered Materials via Extended States 198		
293	9.3 Hopping Charge Transport in Disordered Materials via Localized States 200		
294	8 Electronic Properties of Semiconductor Interfaces 175		
295	8.1 Experimental Database 177		
296	8.2 IFIGS-and-Electronegativity Theory 181		
297	8.3 Comparison of Experiment and Theory 183		
298	8.4 Modifications of Schottky Contacts 187		
299	8.5 Graphene Schottky Contacts 190		
300	7 Photoconductivity in Materials Research 151		
301	7.1 Steady-State Photoconductivity (SSPC) 153		
302	7.2 Constant Photocurrent Method (CPM) and Related Techniques 157		

№	Тема:	ФИО гр. 1	ФИО гр. 2
303	7.3 Steady-State Photocurrent Grating Method (SSPG) 160		
304	7.4 Modulated Photocurrent Spectroscopy (MPC) 161		
305	7.5 Switch-on and Switch-off Transients 164		
306	7.6 Transient Photocurrent Spectroscopy (TPC) 166		
307	7.7 Time-of-Flight (TOF) and Related Techniques 168		
308	7.8 Other Photoconductivity-Related Techniques 171		
309	6 Diffusion in Semiconductors 133		
310	6.1 Basic Concepts 134		
311	6.2 Diffusion Mechanisms 134		
312	6.3 Diffusion Regimes 136		
313	6.4 Internal Electric Fields 138		
314	6.5 Measurement of Diffusion Coefficients 139		
315	6.6 Hydrogen in Semiconductors 140		
316	6.7 Diffusion in Group IV Semiconductors 141		
317	6.8 Diffusion in III–V Compounds 143		
318	6.9 Diffusion in II–VI Compounds 144		
319	6.10 Nano Volume Diffusion 146		
320	6.11 Diffusion in Molten Semiconductors 146		
321	6.12 The Meyer–Neldel Rule 146		
322	5 Defects in Monocrystalline Silicon 111		
323	5.1 Technological Impact of Intrinsic Point Defects Aggregates 112		
324	5.2 Thermophysical Properties of Intrinsic Point Defects 113		
325	5.3 Aggregates of Intrinsic Point Defects 115		
326	5.4 Formation of OSF Ring 127		
327	4 Magnetic Properties: From Traditional to Spintronic 85		
328	4.1 Traditional Magnetism 87		
329	4.2 Nonconventional Magnetism and Progress Toward Spintronics and Quantum Devices 99		
330	4.3 Spintronics and Quantum Information Devices 104		
331	3 Optical Properties of Electronic Materials: Fundamentals and Characterization 47		
332	3.1 Optical Constants 47		
333	3.2 Refractive Index 50		
334	3.3 Optical Absorption 53		
335	3.4 Optical Characterization 69		
336	3.5 Optical Materials 79		
337	2 Electrical Conduction in Metals and Semiconductors 19		
338	2.1 Fundamentals: Drift Velocity, Mobility and Conductivity 20		
339	2.2 Matthiessen's Rule 22		
340	2.3 Resistivity of Metals 23		
341	2.4 Solid Solutions and Nordheim's Rule 26		
342	2.5 Carrier Scattering in Semiconductors 28		
343	2.6 The Boltzmann Transport Equation 29		
344	2.7 Resistivity of Thin Polycrystalline Films 30		
345	2.8 Inhomogeneous Media: Effective Media Approximation 32		
346	2.9 The Hall Effect 35		
347	2.10 High Electric Field Transport 37		

Продолжение табл. 10

№	Тема:	ФИО гр. 1	ФИО гр. 2
348	2.11 Impact Ionization 38		
349	2.12 Two-Dimensional Electron Gas 40		
350	2.13 One-Dimensional Conductance 42		
351	2.14 The Quantum Hall Effect 43		
352	1 Perspectives on Electronic and Photonic Materials 1		
353	1.1 Tremendous Integration 2		
354	1.2 The Silicon Age 3		
355	1.3 The Compound Semiconductors 7		

БЛОКИ ВОПРОСОВ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ ПО РАЗДЕЛАМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ»

В табл. 11 – 18 приведены вопросы для систематизации знаний по каждому разделу курса ТМЭТ.

Таблица 11

Вопросы для раздела «Германий»

№	Задание
1	По каким характеристикам <i>Ge</i> разделяют на группы промышленных марок?
2	Какие структурные дефекты являются основными для совершенной структуры <i>Ge</i> ?
3	В методе химического травления при определении плотности дислокаций как устанавливается образец? (что будет видно в поле микроскопа)?
4	Селективный травитель для <i>Ge</i> ? Зачем он нужен?
5	Полосы скольжения в <i>Ge</i> (откуда берутся и как выглядят)?
6	Какое расхождение диаметра монокристалла <i>Ge</i> допускается по слитку?
7	Методы определения дислокаций в <i>Ge</i> (5 шт.)?
8	Как полируют образец <i>Ge</i> для дальнейшего химического травления?
9	Типы картин распределения дислокаций? (с пояснениями)
10	Как влияет плотность дислокаций на удельное сопротивление и время жизни неосновных носителей заряда? (с графиком)
11	Физические свойства германия
12	Получение двуокиси германия
13	Получение тетрахлорида германия
14	Сырьевые источники германия
15	Схема получения поликристаллического германия
16	Разложение германиевого концентрата
17	Дистилляция тетрахлорида германия
18	Ректификация тетрахлорида германия
19	Параметры гидролиза тетрахлорида германия
20	Получение германия из двуокиси
21	Параметры контроля поликристаллического германия
22	Зонная очистка германия
23	Метод Чохральского для <i>Ge</i> – основные положения
24	Параметры затравки
25	Дефекты в германии
26	Легирование германия

Вопросы для раздела «Кремний»

№	Задание
1	Основные свойства кремния
2	Кремний + кислород
3	Кремний + галогены
4	Кремний + водород
5	Кремний + водород + галогены
6	Растворение кремния
7	Силиконы
8	Основные операции получения кремния
9	Тетрахлоридный метод получения кремния
10	Трихлорсилановый метод получения кремния
11	Водородное восстановление летучих хлоридов кремния
12	Силановый метод получения кремния
13	Монокристаллический кремний
14	Вертикальный метод Бриджмена
15	Горизонтальный метод Бриджмена
16	Метод Чохральского для кремния
17	Метод жидкофазной герметизации кремния
18	Гарнисажный метод кремния
19	Вертикальная безтигельная зонная плавка кремния
20	Горизонтальная зонная плавка кремния
21	Преимущества метода Чохральского перед другими методами получения монокристаллов?
22	Что и как влияет на появление кристаллов у стенок тигля?
23	Какие параметры процесса необходимо менять в процессе выращивания кристалла?
24	Чем ограничивается скорость роста кристалла из расплава? (2 фактора и 2 рисунка)
25	Взаимосвязь между температурой расплава, скоростью вытягивания и диаметром кристалла (2 - 3 варианта)
26	При плоском фронте кристаллизации как появляется жидкий столбик?
27	Если скорость вытягивания и величина теплоотведения через кристалл постоянны, чему будет пропорционален радиус растущего кристалла?
28	Допустимые колебания диаметра кристалла и температуры перегрева
29	Как получить максимальную скорость вытягивания кристалла?
30	Что учитывается при вытягивании из легированного расплава?

Вопросы для раздела «Полупроводниковые соединения и твердые растворы $A^{III}-B^V$ »

№	Задание
1	2 промышленных метода эпитаксии $GaAs$ (с пояснениями)
2	Автоэпитаксия
3	На чем проводят гетероэпитаксию $GaAs$?
4	Метод Нельсона в ж.ф.э. + схема
5	Преимущества ж.ф.э. (4 шт.)
6	Недостатки ж.ф.э. (2 шт.)
7	Хлоридный метод эпитаксии + схема
8	Хлоридно-гидридный метод эпитаксии + схема
9	МОС-гидридный метод эпитаксии + схема
10	Примеры твердых растворов на $GaAs$
11	Какие фазовые свойства плавно меняются в $GaAs_{1-x}P_x$?
12	Состав $GaAs_{1-x}P_x$, соответствующий излучению красного цвета
13	Можно ли получить монокристалл с составом $GaAs_{1-x}P_x$ и как получить этот состав?
14	Ионные формулы соединений (пример)
15	Электроотрицательность
16	Если электроотрицательность растет, то доля ионной связи... и ширина запрещенной зоны...
17	Как определить соединение с полупроводниковыми свойствами по диаграмме состояний?
18	Конгруэнтность плавления
19	Диаграмма состояния компонентов A и B с избытком B , обозначения $S1S2S3S4$, $S2-S3$, $S3-S4$
20	3 условия совершенного кристалла п/п соединения
21	2 правила образования п/п тетраэдрических фаз
22	В формуле $A_{1-x-y-z}...B_xC_yD_z...$ что обозначают A , B , $C...$ и x , y , $z...$?
23	Правило Гримма-Зоммерфельда
24	Формула двойной фазы
25	Формула тройной фазы
26	В тройной фазе элемент C_y может замещать...
27	Дефектная фаза
28	Условия возникновения тройных тетраэдрических фаз (4 шт.)
29	Пример непрерывного твердого раствора для $2K$ системы
30	Пример непрерывного твердого раствора для $2A$ системы
31	Пример концентрационного треугольника
32	Свойства п/п соединений
33	3 особенности технологии п/п соединений
34	Прямой синтез + примеры
35	Косвенный синтез + примеры
36	Диссоциация соединений

№	Задание
37	Примесные и собственные точечные дефекты в A^3B^5
38	Выращивание монокристаллов соединений классическим методом
39	Металлическая запаянная ампула
40	Основные положения метода ж.ф. герметизации
41	Требования к флюсу при ж.ф. герметизации

Таблица 14

Вопросы для раздела «Металлы»

№	Задание
1	Что понимают под связанными и несвязанными металлами (<i>Me</i>) (+ примеры)
2	Редкие металлы
3	Полиметаллическая руда – это
4	На чем основываются при разработке технологии <i>Me</i> ?
5	Что понимают под обогащением руды
6	Что понимают под разложением рудного концентрата
7	Пирометаллургические процессы – основные положения
8	Гидрометаллургические процессы - основные положения
9	Что происходит с <i>Me</i> в реакции с серной кислотой
10	Что происходит с <i>Me</i> в реакции с соляной кислотой
11	Что происходит с <i>Me</i> в реакции с плавиковой кислотой
12	Что происходит с <i>Me</i> в реакции с азотной кислотой
13	Что происходит с <i>Me</i> в реакции с раствором щелочей
14	Как получить чистое химическое соединение <i>Me</i> (кратко)
15	Кристаллизация химических соединений <i>Me</i> – это
16	3 способа получить <i>Me</i> из химических соединений
17	Область применения <i>Al</i>
18	Свойства <i>Al</i>
19	Способы получения технического глинозема (2 шт.)
20	Получение металлического <i>Al</i> (без дополнительных реакций)
21	Область применения <i>In</i>
22	Свойства <i>In</i>
23	Получение <i>In</i> -концентратов
24	Получение технического <i>In</i> и <i>In</i> ВЧ
25	Получение <i>In</i> из отходов п/п производства
26	Область применения <i>Ga</i>
27	Свойства <i>Ga</i>
28	Получение <i>Ga</i> -концентратов
29	Получение технического <i>Ga</i> и <i>Ga</i> ВЧ
30	Получение <i>Ga</i> из отходов п/п производства

№	Задание
31	Область применения <i>W</i>
32	Свойства <i>W</i>
33	Переработка <i>W</i> -концентратов
34	Металлический <i>W</i>
35	Область применения <i>Mo</i>
36	Свойства <i>Mo</i>
37	Получение <i>Mo</i> -концентратов
38	Металлический <i>Mo</i>
39	Область применения <i>Ta</i> и <i>Nb</i>
40	Свойства <i>Ta</i> и <i>Nb</i>
41	Область применения <i>Ti</i>
42	Свойства <i>Ti</i>
43	Обогащение руды <i>Ti</i>
44	Как получить TiO_2
45	Получение металлического <i>Ti</i>
46	Области применения <i>Cu</i>
47	Свойства <i>Cu</i>
48	Получение металлического <i>Cu</i>

Таблица 15

Вопросы для раздела «Легирующие примеси в кремнии»

№	Задание
1	Применение бора и его соединений
2	Свойства бора
3	Минералы бора
4	Получение элементарного бора
5	Получение бора ВЧ
6	Получение гидридов бора
7	Применение фосфора
8	Свойства фосфора
9	Получение фосфора
10	Получение фосфора ВЧ
11	Получение гидрида фосфора
12	Применение мышьяка
13	Свойства мышьяка
14	Получение мышьяка
15	Получение гидрида мышьяка

Таблица 16

Вопросы для раздела «Диэлектрические материалы»

№	Задание
1	Поляризация
2	Виды поляризации
3	Диэлектрическая проницаемость
4	Пробой диэлектрика
5	Элементарные стекла
6	Стекло
7	Оксидные стекла
8	Халькогенидные стекла
9	Оксихалькогенидные стекла
10	Галогенидные стекла
11	Полимерные стекла
12	Затверждение
13	Размягчение
14	Условно стеклообразующий материал
15	Процесс стеклообразования
16	Расстекловывание
17	Критерии оксида, склонного к стеклообразованию
18	Общая химическая формула стекла
19	Силикатное стекло
20	Боратное стекло
21	Фосфатное стекло
22	Халькогенидное стекло
23	Природа стеклокерамики
24	Ситалл
25	Катализация зародышеобразования
26	Типы катализаторов
27	Термообработка для изготовления стеклокерамики (3 стадии)
28	Стеклокерамические системы (пример)
29	Особенности керамических диэлектриков
30	Керамика
31	Технология керамики
32	Виды керамики
33	Органические диэлектрики (основные особенности)
34	Органические диэлектрики – примеры
35	Компаунды
36	Лаки

Таблица 17

Вопросы для раздела «Модификации углерода»

№	Задание
1	Модификации углерода
2	Исходное сырье для поликристаллических алмазов
3	Структура карбина
4	Первая стадия спекания алмазного микропорошка
5	Вторая стадия спекания алмазного микропорошка
6	Условия получения алмазных пленок
7	Осаждение алмазных и алмазоподобных пленок из газовой фазы
8	Метод высокотемпературного осаждения
9	Метод ХТР
10	Метод низкотемпературного осаждения
11	Фуллерены
12	Нанотрубка это ...
13	Виды нанотрубок
14	Разрядно-дуговой метод получения нанотрубок
15	метод лазерной абляции при получении нанотрубок
16	Метод осаждения из газовой фазы при получении нанотрубок

Таблица 18

Вопросы для раздела «Органические соединения в микро- и наноэлектронике»

№	Задание
1	Органические соединения 1 группы
2	Органические соединения 2 группы
3	Органические соединения 3 группы
4	Органические соединения 4 группы
5	Органические соединения 5 группы
6	Органические соединения селена и теллура
7	Органические соединения переходных металлов
8	Технология диспергируемых некристаллических материалов
9	Технология ленточных некристаллических материалов
10	Технология очистки газов
11	Технология воды высокой чистоты

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов Н. Т. Основы нанотехнологии: учебник / Н. Т. Кузнецов, В. М. Новоторцев, В. А. Жабров, В. И. Марголин. - Эл. изд. - Электрон. текстовые дан. (1 файл pdf : 400 с.). - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 400 с.
2. Плотникова Екатерина Юрьевна. Синтез и свойства металлооксидных пленок на основе ZnO , SnO_2 и TiO_2 для прозрачных полевых транзисторов: диссертация ... кандидата технических наук: 05.27.01 / Плотникова Екатерина Юрьевна; [Место защиты: Воронежский государственный технический университет, www.vorstu.ru]. - Воронеж, 2015. - 170 с.
3. Инструкция по эксплуатации лабораторного стенда Leso-3. Электрон. дан. – Режим доступа: http://www.labfor.ru/devices/leso3/leso3_manual. – Текст – электронный.
4. Safa Kasap. Handbook of electronic and photonic materials / Kasap Safa, Capper Peter // Springer Science+Business Media, Inc, 2006. – 1404 p. – Текст: электронный.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторная работа 1. Изучение элементного состава образцов тонких металлооксидных пленок и измерение их толщины на микроинтерферометре МИИ-4.....	3
Лабораторная работа 2. Расчёт характеристик образцов, исследованных методом рентгено-дифракционного анализа (XRD) и методом атомно-силовой микроскопии (АСМ).....	6
Лабораторная работа 3. Исследования спектров пропускания и поглощения тонкопленочных металлооксидных образцов методами спектрометрии.....	12
Лабораторная работа 4. Измерение электрических характеристик тонких проводящих и полупроводниковых пленок с помощью лабораторного измерительного стенда Leso3.....	16
Практические работы по дисциплине «Технология материалов электронной техники».....	20
Блоки вопросов для самопроверки по разделам по дисциплине «Технология материалов электронной техники».....	29
Библиографический список.....	36

ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОНИКИ И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных и практических работ
по дисциплине «Технология материалов электронной техники»
для студентов направления
11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»
всех форм обучения

Составитель
Плотникова Екатерина Юрьевна

В авторской редакции

Подписано к изданию 10.01.2024.
Уч.-изд. л. 2,0.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84