

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДАЮ:

Декан

А. Г. Коротаев

Оценочные материалы по дисциплине

Сенсоры

по направлению подготовки

**03.04.03 Радиофизика**

Направленность (профиль) подготовки:

**Материалы и устройства функциональной электроники и фотоники**

Форма обучения

**Очная**

Квалификация

**Магистр**

Год приема

**2025**

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОП

И.А. Прудаев

Председатель УМК

А.П. Коханенко

Томск – 2025

## **1. Компетенции и индикаторы их достижения, проверяемые данными оценочными материалами**

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ПК-3 Способен использовать современное оборудование для решения профессиональных задач в области радиофизики и электроники.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИПК 3.1 Понимает принципы действия устройств и систем, предназначенных для решения задач в области радиофизики и электроники

ИПК 3.2 Проводит измерения с использованием современных устройств и систем для решения профессиональных задач

## **2. Оценочные материалы текущего контроля и критерии оценивания**

Элементы текущего контроля:

- тесты;
- лабораторные работы;

В ходе контроля проверяется достижение обучающимися следующих результатов обучения: ИПК-3.1 (Понимает принципы действия устройств и систем, предназначенных для решения задач в области радиофизики и электроники), ИПК-3.2 (Проводит измерения с использованием современных устройств и систем для решения профессиональных задач).

### **Примерный перечень вопросов для самостоятельной работы студентов (тестов)**

1. Что такое сенсор? Каково его назначение?
2. Типы датчиков.
3. Назовите типы характеристик датчиков.
4. Что такое функция преобразования датчика?
5. Запишите формулу для определения чувствительности любого датчика в общем виде.
6. Что определяют метрологические и динамические характеристики сенсоров?
7. Поясните принцип действия датчика магнитного поля на основе эффекта Холла.
8. Поясните принцип действия датчика магнитного поля на основе магниторезистора.
9. В чём заключается магнитодиодный эффект? Как изменяются характеристики магнитодиодов с тонкой и толстой базами при приложении магнитного поля?
10. Сформулируйте определения следующих параметров магнитодиодов: токовая магниточувствительность, вольтовая магниточувствительность, относительная вольтовая чувствительность.
11. Какие полупроводники используются для изготовления магнитодиодов?
12. Структура биполярного магнитотранзистора.
13. Поясните принцип действия датчика магнитного поля с частотным выходом на основе винтовой неустойчивости полупроводниковой плазмы в Si.
14. Какие материалы используются для изготовления терморезисторов?
15. Запишите выражение для температурного коэффициента сопротивления терморезистора и опишите способ его определения.
16. Какие два уравнения описывают статическую вольт-амперную характеристику (ВАХ) терморезистора? Какой вид имеет ВАХ?
17. Перечислите основные характеристики полупроводникового термистора.

18. Какая величина используется в качестве термочувствительного параметра в термодатчиках на основе диодов с барьером Шоттки?

19. Датчики температуры на основе структур с  $p$ - $n$ -переходом: диоды, биполярные и полевые транзисторы.

20. Какими преимуществами обладают датчики температуры с частотным выходом перед аналоговыми датчиками?

21. В чем заключается тензорезистивный эффект в полупроводниках?

22. Поясните принцип действия полупроводникового тензорезистора, дайте определение коэффициента тензочувствительности.

23. Тензодатчики на основе диодов с барьером Шоттки.

24. Тензодатчики на основе диодов с  $p$ - $n$ -переходом.

25. Тензодатчики на основе биполярных и полевых транзисторов.

26. Чем отличаются процессы физической и химической, активированной и неактивированной адсорбции частиц газа на поверхность твердого тела?

27. Изобразите изменения зонной структуры диоксида олова при химической адсорбции кислорода в вакууме и при химической адсорбции частиц восстановительного газа в воздушной среде.

28. Поясните механизмы проводимости в металлооксидных полупроводниках, используемых для создания газовых сенсоров.

29. Охарактеризуйте механизмы чувствительности металлооксидных полупроводников к воздействию восстановительных и окислительных газов.

30. Поясните механизм влияния молекулярного водорода на вольт-фарадную характеристику (ВФХ) МОП-структуры  $\text{Pd-SiO}_2$ - $n$ - $\text{Si}$ .

31. Запишите выражение для напряжения плоских зон и поясните механизм влияния водорода на ВФХ туннельного МОП-диода ( $\text{Pd-SiO}_2$ - $n$ - $\text{Si}$ ).

32. Каким выражением можно описать зависимость изменения напряжения плоских зон МОП-структуры и МОП-диода от концентрации водорода?

33. В чем заключается принцип работы высокотемпературных датчиков кислорода на основе оксида галлия?

34. Каким образом изменения химического состава атмосферы влияют на характеристики газовых сенсоров на основе диодов с барьером Шоттки и гетеропереходом, биполярных транзисторов.

35. В чем заключаются прямой и обратный пьезоэффекты?

36. Какие свойства и характеристики пьезоматериалов используют для создания микрофонов, датчиков силы и температуры?

37. Поясните принцип действия пьезорезистивных датчиков давления.

38. Опишите механизм чувствительности ПАВ-сенсоров к воздействию газов. В чем заключается преимущество ПАВ-сенсоров?

39. Перечислите базовые материалы и технологии МЭМС.

40. Опишите физические основы функционирования и области применения МЭМС-устройств: датчиков давления, гироскопов, актуаторов.

41. Опишите физические основы функционирования и области применения МЭМС-устройств: акселерометров, датчиков температуры, оптических МЭМС.

42. Приведите примеры использования МЭМС-технологии и элементов для повышения эффективности функционирования полупроводниковых сенсоров.

43. Что такое поверхностный плазмонный резонанс?

44. Для чего служат плазмонные сенсоры и в чем заключается их принцип работы?
45. Поясните принцип работы термокаталитических датчиков метана.
46. Что такое термопара?
47. Опишите принципы работы датчиков магнитного поля на основе ферромагнетиков.
48. Какие свойства присущи пирозлектрикам и сегнетоэлектрикам? Как эти свойства используют для создания датчиков?
49. Поясните принцип действия пирозлектрических датчиков ИК-излучений и датчиков движения.
50. В чем заключается механизм чувствительности емкостного датчика влажности на основе пористого  $\text{SiO}_2$ ? Перечислите основные датчики влажности, используемые в современное время.
51. Чем обусловлен интерес к исследованию органических полупроводников по сенсорной тематике?
52. В чем заключается принцип работы биосенсоров на основе органических транзисторов и МЭМС? Какой тип сенсоров лучше и почему?

#### **Контрольные вопросы для лабораторных занятий:**

1. Что такое датчиков Холла? Его назначение
2. Принцип действия и основные характеристики сенсоров температуры на основе тонких пленок металлов Pt и Cu.
3. Зависимость сопротивления широкозонных полупроводников от температуры.
4. Температурная зависимость характеристик приборов с p–n-переходом.
5. Принцип действия мостовой схемы Уитстона для измерения малых деформаций на основе полупроводниковых и металлических тензорезисторов.
6. Принцип действия резистивных сенсоров водорода на основе металлооксидных полупроводников.
7. Принцип действия сенсоров угарного газа на основе кремниевых МДП-структур.
8. Схема измерения влажности датчиком емкостного типа на основе пористого  $\text{SiO}_2$ .

### **3. Оценочные материалы итогового контроля (промежуточной аттестации) и критерии оценивания**

В ходе контроля проверяется достижение обучающимися следующих результатов обучения: ИПК-3.1 (Понимает принципы действия устройств и систем, предназначенных для решения задач в области радиофизики и электроники).

#### **Примерный перечень теоретических вопросов:**

1. Влияние химической адсорбции частиц газов на свойства металлооксидных полупроводников. Изменения зонной структуры, перезарядка поверхности полупроводника. Поверхностная плотность адсорбированных частиц.
2. Получить выражения для электрической проводимости и отклика газового сенсора на основе металлооксидного полупроводника при воздействии восстановительного газа в рамках надбарьерной модели переноса носителей заряда. Влияние влажности на характеристики сенсоров.

3. Получить выражения для электрической проводимости и отклика газового сенсора на основе металлооксидного полупроводника при воздействии окислительного газа в рамках канальной модели переноса носителей заряда. Пути обеспечения селективности сенсоров по отношению к детектируемому газу.
4. Получить выражение для изменения напряжения плоских зон туннельного МОП-диода ( $\text{Pd-SiO}_2\text{-}n\text{-Si}$ ) при воздействии водорода.
5. Полупроводниковые терморезисторы. Принцип действия, статическая вольт-амперная характеристика, температурный коэффициент сопротивления.
6. Датчик температуры на основе приборов:  $p$ - $n$ -перехода и МДП-структур
7. Датчики магнитного поля на основе эффекта Холла. Принцип действия и основные характеристики.
8. Магниторезистивный эффект. Магниторезисторы: принцип действия и конструкции.
9. Магнитодиоды. Биполярные магнитотранзисторы.
10. Влияние деформации на электрофизические параметры полупроводников.
11. Тензодатчики на основе диодов с  $p$ - $n$ -переходом, возможные механизмы влияния одноосного и всестороннего сжатия на прямой и обратный ток, преимущества перед тензорезисторами.
12. Тензорезисторы. Принцип действия и конструкции.
13. Тензодатчики на основе биполярных и полевых транзисторов.
14. Тензодатчики на основе гетеропереходов и барьеров Шоттки.
15. Базовые материалы и технология изготовления микромашининга.
16. Микроэлектромеханические устройства: датчики давления, акселерометры, гироскопы.
17. Микроэлектромеханические устройства: актуаторы, датчики температуры, оптические МЭМС.
18. Свойства и характеристики пьезоматериалов.
19. Пьезорезистивные датчики давления. Пьезоэлектрические микрофоны. Пьезоэлектрические датчики температуры.
20. Тактильные чувствительные элементы и датчики силы. ПАВ-сенсоры.
21. Принцип работы химических датчиков и биосенсоров на основе явления поверхностного плазмонного резонанса.
22. Термоэлектрические эффекты. Термоэлектрические преобразователи: принципы применения, разновидности, погрешности измерений. Металлические термометры сопротивления.
23. Пирозлектрики и сегнетоэлектрики. Диэлектрические датчики температуры. Пирозлектрические датчики ИК-излучений.
24. Пирозлектрические датчики движения. Электретные микрофоны. Датчики влажности емкостного типа.
25. Биосенсоры, датчики давления и температуры на основе органических полупроводников.

Студент, не аттестованный в контрольной точке, не допускается к сдаче экзамена. Результаты экзамена определяются оценками согласно таблице.

| Компетенция                                                                                                                           | Индикатор компетенции                                                                                                                  | Критерии оценивания результатов обучения                                          |                                                                           |                                                                    |                                                                                                                                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                       |                                                                                                                                        | Неудовлетворительно                                                               | Удовлетворительно                                                         | Хорошо                                                             | Отлично                                                                                                                                            |
| <b>ПК-3</b><br>Способен использовать современное оборудование для решения профессиональных задач в области радиофизики и электроники. | <b>ИПК 3.1</b><br>Понимает принципы действия устройств и систем, предназначенных для решения задач в области радиофизики и электроники | Не имеет представления о физических принципах работы сенсорных устройств и систем | Имеет общее представление о принципах работы сенсорных устройств и систем | Описывает физические принципы работы сенсорных устройств и систем. | Уверенно и детально описывает принцип действия сенсорных устройств и систем, предназначенных для решения задач в области радиофизики и электроники |

#### 4. Оценочные материалы для проверки остаточных знаний (сформированности компетенций)

Вопросы теста для оценки остаточных знаний по дисциплине

(верные ответы выделены курсивом)

| № | Вопросы                                                                                                                                                        | Ответы                                                                                                                                                                                                          |
|---|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Какова энергия связи хемосорбированной молекулы?                                                                                                               | 1) менее 0,1 эВ.<br>2) <i>более 1,0 эВ.</i><br>3) от 0,1 эВ до 1,0 эВ.                                                                                                                                          |
| 2 | Чем обусловлена чувствительность датчиков на основе оксида галлия к кислороду?                                                                                 | 1) Изменением концентрации вакансий кислорода при высоких температурах.<br>2) Хемосорбцией частиц кислорода на поверхность полупроводника.<br>3) <i>Верны оба ответа.</i>                                       |
| 3 | Как изменяются изгиб энергетических зон вблизи поверхности нанокристаллитов диоксида олова и проводимость пленки при адсорбции частиц восстановительных газов? | 1) Изгиб зон увеличивается, проводимость уменьшается.<br>2) Изгиб зон и проводимость увеличиваются.<br>3) <i>Изгиб зон уменьшается, проводимость увеличивается.</i><br>4) Изгиб зон и проводимость уменьшаются. |
| 4 | Как изменяется проводимость газовых                                                                                                                            | 1) Проводимость не изменяется.<br>2) Проводимость растёт.                                                                                                                                                       |

|    |                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    | сенсоров на основе полупроводников <i>n</i> -типа при адсорбции молекул диоксида азота?                         | 3) <i>Проводимость падает.</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 5  | Какой параметр МОП-структуры $\text{Pd-SiO}_2\text{-}n\text{-Si}$ меняется при изменении концентрации водорода? | 1) Проводимость.<br>2) <i>Ёмкость.</i><br>3) Индуктивность.<br>4) Данная структура не реагирует на водород.                                                                                                                                                                                                                         |
| 6  | Какими температурными коэффициентами сопротивления (ТКС) обладают терморезисторы?                               | 1) ТКС всегда положительны (с ростом температуры растет сопротивление).<br>2) ТКС всегда отрицательны (с ростом температуры падает сопротивление).<br>3) Возможны положительные и отрицательные ТКС – в зависимости от температуры.<br>4) <i>Возможны положительные и отрицательные ТКС – в зависимости от типа терморезистора.</i> |
| 7  | В чем преимущество датчиков с частотным выходом?                                                                | 1) Требуется меньшее напряжения питания.<br>2) Компактные размеры датчиков с частотным выходом.<br>3) <i>Удобно использовать совместно с цифровой электроникой.</i>                                                                                                                                                                 |
| 8  | С чем преимущественно связано изменение проводимости полупроводниковых тензодатчиков?                           | 1) С изменением концентрации дырок и/или электронов в полупроводнике.<br>2) <i>С изменением подвижности дырок и электронов.</i><br>3) С локальным изменением температуры в области деформации полупроводника.<br>4) С изменением концентрации ионизированных доноров и/или акцепторов в области деформации полупроводника.          |
| 9  | Какую физическую величину измеряет акселерометр?                                                                | 1) Давление.<br>2) Скорость.<br>3) Положение в пространстве.<br>4) Температуру.<br>5) <i>Ускорение.</i>                                                                                                                                                                                                                             |
| 10 | Чем принципиально отличается конструкция биполярного магнитотранзистора?                                        | 1) Наличием двух эмиттерных переходов.<br>2) <i>Наличием двух коллекторных переходов.</i><br>3) Оба ответа верны.                                                                                                                                                                                                                   |
| 11 | Что такое порог чувствительности или разрешающая способность датчика?                                           | 1) <i>Минимальное значение входной величины, которое может быть уверенно выявлено данным датчиком.</i><br>2) Максимальное значение входной величины, которое может быть уверенно выявлено данным датчиком.<br>3) Нет верного ответа.                                                                                                |
| 12 | Выберите правильное определение термина «воспроизводимость».                                                    | 1) Свойство датчика сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния, при котором он не способен выполнять все или одну из своих функций, в том числе не обеспечивать выполнение каких-либо параметров в заданных пределах<br>2) <i>Способность датчика при одинаковых условиях</i>                         |

|    |                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |                                                                                                                                                       | <p><i>выдавать одинаковые результаты</i></p> <p>3) Свойство датчика сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность датчика выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения.</p>                            |
| 13 | В основе работы, каких из перечисленных датчиков лежит явление перераспределения свободных носителей заряда в долинах разрешенных зон полупроводника? | <p>1) Химические датчики.</p> <p>2) Пеллисторы.</p> <p>3) Термисторы.</p> <p>4) <i>Тензодатчики.</i></p> <p>5) МЭМС-акселерометры.</p> <p>6) ПАВ-сенсоры.</p>                                                                                                                        |
| 14 | Какие названия в литературе получили системы, включающие в себя взаимосвязанные механические и электрические компоненты микронных размеров?           | <p>1) Микроэлектромеханические системы.</p> <p>2) Микромашинные системы (микромашины).</p> <p>3) Микросистемы.</p> <p>4) <i>Верны все перечисленные ответы</i></p>                                                                                                                   |
| 15 | Чем отличаются аддитивный и субтрактивный подходы формирования МЭМС?                                                                                  | <p>1) <i>Для первого характерно наращивание слоев на исходной подложке, а для второго – вытравливание структуры из исходной подложки.</i></p> <p>2) Для первого характерно вытравливание структуры из исходной подложки, а для второго – наращивание слоев на исходной подложке.</p> |
| 16 | Какой эффект лежит в основе работы резонансных пьезодатчиков?                                                                                         | <p>1) Прямой пьезоэффект.</p> <p>2) <i>Обратный пьезоэффект.</i></p> <p>3) Эффект Зеебека.</p>                                                                                                                                                                                       |
| 17 | Какой эффект лежит в основе работы термопар?                                                                                                          | <p>1) Прямой пьезоэффект.</p> <p>2) Обратный пьезоэффект.</p> <p>3) <i>Эффект Зеебека.</i></p>                                                                                                                                                                                       |
| 18 | Для чего служит пирометр?                                                                                                                             | <p>1) Для определения характеристик пирозлектриков.</p> <p>2) <i>Для бесконтактного измерения температуры.</i></p> <p>3) Для контактного измерения температуры жидкостей.</p>                                                                                                        |

### Информация о разработчиках

Алмаев Алексей Викторович, кандидат физико-математических наук,  
Радиофизический факультет ТГУ, доцент.