

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

## **АКУСТООПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА**

Методические указания к практическим занятиям и по самостоятельной работе  
для студентов технических направлений подготовки

Томск 2024

УДК 537:53(075.8)  
ББК 22.34я73  
Б91

**Буримов, Николай Иванович**

Б91 Акустооптические приборы и устройства: Методические указания к практическим занятиям и по самостоятельной работе для студентов технических направлений подготовки / Н.И. Буримов, С.М. Шандаров, Л.Я. Серебренников, А.С. Акрестина. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2024. – 10 с.

Представлены методические указания к практическим занятиям и по самостоятельной работе для студентов технических направлений подготовки. Цель данной работы: формирование у студентов представлений о фундаментальных основах оптической физики, которая является важным компонентом естественно-научного базиса подготовки студентов.

Одобрено на заседании каф. ЭП, протокол № 05-24 от 08.05.2024 г.

УДК 537:53(075.8)  
ББК 22.34я73

© Буримов Н.И, Шандаров С.М.,  
Серебренников Л.Я.,  
Акрестина А.С. 2024

© Томск. гос. ун-т систем упр. и  
радиоэлектроники, 2024

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Раздел 1. Введение.....	5
1.1 Содержание раздела.....	5
1.2 Методические указания по изучению раздела.....	5
Раздел 2 Поверхностные акустические волны в твердых телах.....	5
2.1 Содержание раздела.....	5
2.2 Методические указания по изучению раздела.....	5
2.3. Вопросы для самопроверки.....	5
Раздел 3. Устройства обработки сигналов на ПАВ.....	6
3.1 Содержание раздела.....	6
3.2 Методические указания по изучению раздела.....	6
3.3. Вопросы для самопроверки.....	6
Раздел 4. Нелинейные устройства на ПАВ.....	7
4.1 Содержание раздела.....	7
4.2 Методические указания по изучению раздела.....	7
4.3. Вопросы для самопроверки.....	7
Раздел 5. Технология изготовления акустоэлектронных приборов.....	7
5.1 Содержание раздела.....	7
5.2 Методические указания по изучению раздела.....	8
5.3. Вопросы для самопроверки.....	8
6. Лабораторные работы.....	8
7. Темы для самостоятельного изучения.....	9
Список литературы.....	9

## ВВЕДЕНИЕ

Необходимость изучения курса «Акустоэлектронные приборы и устройства» продиктована успешным развитием направления и перспективностью использования акустоэлектронных устройств в современных системах автоматизации, управления, передачи и хранения информации и многих других.

Название «Акустоэлектронные приборы» включает в себя широкий спектр устройств, принцип работы которых основан на возбуждении, распространении и регистрации акустических волн (АВ) в твердых телах. В качестве примеров можно назвать кварцевые автогенераторы, ультразвуковые линии задержки, акустооптические модуляторы, приборы с акустическим переносом заряда и многие другие. Отметим, что наиболее широкое применение в радиоэлектронных системах нашли устройства, использующие так называемые поверхностные акустические волны (ПАВ), существование которых впервые предсказал лорд Рэлей. Такие АВ распространяются вдоль свободной границы твердого тела, их амплитуда экспоненциально убывает с глубиной, так что 90 % переносимой энергии сосредоточено в слое глубиной не более одной длины волны. Ключевым моментом развития техники ПАВ явилось изобретение в середине шестидесятых годов прошлого столетия встречно-штыревого преобразователя (ВШП). Использование для изготовления ВШП планарной технологии, применяемой при производстве интегральных микросхем, наряду с обеспечением доступа к поверхности материала и возможностью управления параметрами ПАВ, позволило существенно расширить функциональные возможности акустоэлектронных приборов на ПАВ и сделать их доступными для массового производства.

В настоящее время известно несколько десятков типов устройств на ПАВ, выпускающихся в промышленных масштабах, среди которых линии задержки, трансверсальные фильтры, ПАВ-резонаторы и другие.

Естественно, что детальное изучение приборов на ПАВ даже в достаточно большом курсе не представляется возможным, поэтому в данном учебном пособии рассматриваются только основные теоретические положения возбуждения, распространения и регистрации ПАВ в твердых телах, принципы построения акустоэлектронных устройств, которые чаще всего используются в радиоэлектронных системах и некоторые особенности технологии их производства.

Изучение данной дисциплины базируется на знаниях, полученных студентами по дисциплинам:

1. «Физика» (механика: кинематика, законы Ньютона, работа и механическая энергия, динамика вращательного движения, законы сохранения; электричество и магнетизм: электростатика и магнитостатика в вакууме и веществе, законы постоянного тока, электромагнитная индукция, уравнения Максвелла; колебания и волны).

2. «Математика» (аналитическая геометрия и линейная алгебра; дифференциальное и интегральное исчисления; векторный анализ и элементы теории поля; гармонический анализ; дифференциальные уравнения; уравнения математической физики; функции комплексного переменного).

## **Раздел 1 Введение**

### **1.1. Содержание раздела**

Предмет дисциплины и ее задачи. Связь дисциплины с другими разделами физики. Содержание курса.

### **1.2. Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела «Введение» следует обратить внимание на прикладной характер дисциплины и на широкое использование рассматриваемых в ней акустоэлектронных приборов в системах передачи, обработки и хранения информации.

## **Раздел 2. Поверхностные акустические волны в твердых телах**

### **2.1. Содержание раздела**

Распространение поверхностных акустических (ПАВ) волн в твердых телах. Уравнения движения упругой среды. Типы ПАВ. Распространение ПАВ в пьезокристаллах. Дифракция ПАВ. Затухание ПАВ. Поток энергии ПАВ. Возбуждение ПАВ.

### **2.2. Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела особое внимание необходимо обратить на методики анализа распространения ПАВ и расчета параметров встречно-штыревых преобразователей (ВШП).

### **2.3. Вопросы для самопроверки**

1. Какие акустические волны принято называть поверхностными? Перечислите типы ПАВ.
2. Запишите уравнения состояния упругой среды с учетом пьезоэффекта.
3. Запишите уравнения движения упругой среды с учетом пьезоэффекта.
4. Дайте определение саггитальной плоскости.
5. Почему скорость ПАВ, распространяющейся вдоль свободной поверхности больше скорости ПАВ, распространяющейся вдоль металлизированной поверхности?
6. Какими параметрами определяется затухание ПАВ в пьезокристаллах?
7. Перечислите основные типы преобразователей ПАВ.
8. Объясните принцип работы электродных пьезопреобразователей. Какова роль пьезоэффекта?

9. Какие виды эквивалентных схем электродных пьезопреобразователей Вы знаете?
10. Перечислите основные методики расчета параметров ВШП.
11. Какими параметрами определяется полоса пропускания ВШП?

### **Раздел 3. Устройства обработки сигналов на ПАВ**

#### **3.1. Содержание раздела**

Линии задержки на ПАВ. Резонаторы на ПАВ. Генераторы на ПАВ. Фильтры на ПАВ. Устройства на ПАВ для систем связи.

#### **3.2. Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела особое внимание необходимо обратить на методики расчета фильтров ПАВ и принципы построения устройств на ПАВ для систем связи.

#### **3.3. Вопросы для самопроверки**

1. Перечислите основные характеристики устройств на ПАВ.
2. Дайте определение выходных сигналов, характерных для устройств на ПАВ. Перечислите основные методы подавления ложных сигналов.
3. Опишите принципы работы резонаторов на ПАВ
4. Нарисуйте основные виды резонаторов на ПАВ. В чем их преимущества по сравнению с объемными резонаторами?
5. Опишите принципы работы генераторов на ПАВ
6. Нарисуйте основные виды генераторов на ПАВ. В чем их преимущества по сравнению с другими типами?
7. Какие фильтры называют трансверсальными? Дайте определение.
8. Дайте определение аподизации ВШП.
9. Какие методы синтеза фильтров на ПАВ Вы знаете? В чем их преимущества и недостатки?
10. В чем преимущества фильтров на ПАВ по сравнению с другими типами?
11. Дайте определение шумоподобных сигналов. Перечислите основные виды, используемые в системах связи.
12. Дайте определение автокорреляционной функции.
13. Нарисуйте формирователь фазоманипулированной последовательности Баркера на ПАВ. Опишите принцип работы.
14. Нарисуйте приемник фазоманипулированной последовательности Баркера на ПАВ. Опишите принцип работы.

## **Раздел 4. Нелинейные устройства на ПАВ**

### **4.1. Содержание раздела**

Свертка сигналов. Принцип работы акустоэлектронных конвольверов. Основные характеристики акустоэлектронных конвольверов. Типы конвольверов.

### **4.2. Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела особое внимание необходимо обратить на методики синтеза конвольверов на ПАВ и принципы построения устройств на основе акустоэлектронных конвольверов.

### **4.3. Вопросы для самопроверки**

1. Дайте определение свертки сигналов.
2. Запишите уравнения, характеризующие процессы нелинейного взаимодействия ПАВ.
3. Дайте определение билинейного коэффициента. Какими параметрами определяется его величина?
4. Нарисуйте схему вырожденного конвольвера на ПАВ и опишите принцип его работы.
5. Нарисуйте схему невырожденного конвольвера на ПАВ и опишите принцип его работы.
6. Дайте определение акустического волновода и нарисуйте основные типы.
7. Нарисуйте схему волноводного конвольвера на ПАВ и опишите принцип его работы.
8. Нарисуйте схему полупроводникового конвольвера на ПАВ и опишите принцип его работы.
9. Нарисуйте схему полупроводникового конвольвера с памятью на ПАВ и опишите принцип его работы.
10. Опишите принципы работы конвольверов на ПАВ в системах обработки сигналов.

## **Раздел 5. Технология изготовления акустоэлектронных приборов**

### **5.1. Содержание раздела**

Изготовление звукопровода. Технология изготовления прецизионных фотошаблонов. Трехступенчатая схема изготовления фотошаблонов. Двухступенчатая схема изготовления фотошаблонов. Одноступенчатая схема изготовления фотошаблонов. Методы напыления материалов на акустические подложки. Особенности фотолитографических процессов при изготовлении акустоэлектронных устройств. Сборка и монтаж устройств на ПАВ.

## **5.2. Методические указания по изучению раздела**

При изучении раздела особое внимание необходимо обратить на методики напыления материалов на акустические подложки и особенности процессов сборки и монтажа акустоэлектронных приборов.

### **5.3. Вопросы для самопроверки**

1. Перечислите методы синтеза материалов для акустоэлектронных устройств.

2. Перечислите этапы изготовления звукопроводов для устройств на ПАВ. Дайте характеристику каждого этапа.

3. Перечислите методы изготовления фотошаблонов.

4. Дайте сравнительную характеристику методов изготовления фотошаблонов для устройств на ПАВ.

5. Дайте описание трехступенчатой схемы изготовления фотошаблонов для устройств на ПАВ. Каковы ее преимущества и недостатки по сравнению с одно- и двухступенчатыми схемами?

6. Перечислите методы нанесения пленок на поверхность звукопроводов и дайте их сравнительную характеристику.

7. Какие материалы используются для металлизации звукопроводов и изготовления ВШП?

8. Каковы особенности фотолитографических процессов при изготовлении акустоэлектронных устройств?

9. Назовите способы обеспечения контактов электродных структур с корпусом и внешними устройствами.

10. Перечислите основные типы корпусов для устройств на ПАВ.

## **6. Лабораторные работы**

В процессе выполнения лабораторных занятий студент не только закрепляет теоретические знания, но и пополняет их. Вся работа при выполнении лабораторной работы разбивается на следующие этапы: вступительный, проведение эксперимента и (или) численных расчетов и обработка результатов.

В процессе домашней подготовки студент проверяет качество усвоения проработанного материала по вопросам для самоконтроля, относящимся к изучаемой теме. Без проведения такой предварительной подготовки к лабораторной работе студент не допускается к выполнению эксперимента.

Помимо домашней работы, студенты готовятся к выполнению эксперимента также на рабочем месте: они знакомятся с установкой, уточняют порядок выполнения работы, распределяют рабочие функции между членами бригады. В ходе аудиторной подготовки преподаватель путем собеседования выявляет и оценивает степень готовности каждого студента к проведению эксперимента и (или) численных расчетов, как и знание им теоретического материала. Студенты, не подготовленные к выполнению работы или не представившие отчеты по предыдущей работе, к выполнению новой работы могут быть не допущены и все отведенное время для лабораторной работы должны



находиться в лаборатории, изучать по рекомендованной литературе тот материал, с которым они не познакомились дома. К выполнению работы они могут быть допущены только после собеседования и в часы сверх расписания, по договоренности с преподавателем. Все пропущенные лабораторные работы по уважительным или неуважительным причинам могут быть выполнены в конце семестра на дополнительных занятиях.

Второй этап работы – проведение эксперимента и (или) численных расчетов в лаборатории. На этом этапе очень важно, чтобы студент выполнил самостоятельно и грамотно необходимые измерения и наблюдения, а также, если это определено заданием, численные расчеты, укладываясь в отведенное для этого время. При организации своей работы для проведения эксперимента и (или) численных расчетов целесообразно исходить из рекомендаций, изложенных в руководствах для выполняемой лабораторной работы.

На последнем этапе работы студент производит обработку данных измерений и расчетов и анализ полученных результатов.

Отчет студента по работе должен быть индивидуальным. Анализ результатов является важной частью отчета.

Ниже приведены названия лабораторных работ.

1. Исследование акустооптического модулятора.
2. Исследование линии задержки на ПАВ.
3. Исследование полосового фильтра на ПАВ.
4. Исследование планарного акустооптического модулятора

## **7. Темы для самостоятельного изучения**

Темы для самостоятельного изучения обобщают приобретенные знания и позволяют студенту самостоятельно решать задачи. Тематика самостоятельных работ предполагает углубленное изучение ниже предложенных тем.

1. Полосовые фильтры на ПАВ.
2. Устройства сжатия сигналов на ПАВ
3. Применения устройств на ПАВ для определения частоты сигналов.
4. Полупроводниковые конвольверы
5. Планарные акустооптические устройства.

Студент защищает реферат по одной выбранной им теме.

## **Список литературы**

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. – М.: Наука, 1965.- 202 с.
2. Ю.И. Сиротин, М.П. Шаскольская. Основы кристаллофизики.–М.: Наука, 1975.- 640 с.

3. Балакирев М.К., Гишинский И.М. Волны в пьезокристаллах. – Новосибирск: Наука, 1982. – 240 с.
4. Яковкин И.Б., Петров Д.В. Дифракция света на акустических поверхностных волнах. / Новосибирск, Наука, 1979, 184 с.
5. R.M. White and F.W. Voltmer. Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves // Appl. Phys. Lett. 1965, V. 17, P. 314-316.
6. Фильтры на поверхностных акустических волнах (расчёт, технология и применение). Пер. с англ./ Под ред. Г. Мэтьюза - М.: Радио и связь, 1981.- 472 с.
7. Поверхностные акустические волны. Пер. с англ. / Под ред. А.Олинера. - М.: Мир, 1981. - 390 с.
8. Морган Д. Устройства обработки сигналов на поверхностные акустических волнах: Пер. с англ. / М.: Радио и связь, 1990. - 416 с.
9. Бондаренко В.С., Орлов В.С. Фильтры на поверхностных акустических волнах. – М.: Радио и связь, 1984. – 272с.
10. Серебренников Л.Я., Шандаров В.М., Шандаров С.М. Широкополосное возбуждение упругих поверхностных волн СВЧ диапазона торцевым преобразователем.// Письма в ЖТФ, 1979 - том 5. вып.5, с. 288-290.