

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный  
технический университет»

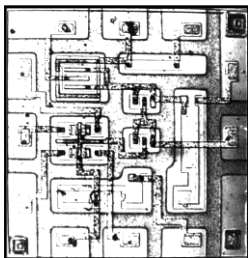
Кафедра полупроводниковой электроники и наноэлектроники

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению контрольной работы № 2 по дисциплине

**«Физические основы электроники»**

для студентов направления подготовки бакалавров  
210100 «Электроника и наноэлектроника», профиля  
«Микроэлектроника и твердотельная электроника»  
заочной формы обучения



Воронеж 2013

Составитель канд. техн. наук Т.В. Свистова

УДК 621.382.2

Методические указания к выполнению контрольной работы № 2 по дисциплине «Физические основы электроники» для студентов направления подготовки бакалавров 210100 «Электроника и наноэлектроника», профиля «Микроэлектроника и твердотельная электроника» заочной формы обучения / ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет»; сост. Т.В. Свистова. Воронеж, 2013. 20 с.

Методические указания включают содержание контрольной работы, варианты и порядок выполнения работы, общие пояснения к тексту заданий, библиографический список рекомендуемой литературы.

Методические указания предназначены для студентов третьего курса

Издание подготовлено в электронном виде в текстовом редакторе MS WORD XP и содержится в файле «Му\_кр\_2\_ФОЭ.doc».

Табл. 7. Библиогр.: 7 назв.

Рецензент канд. физ.-мат. наук, доц. Е.В. Бордаков

Ответственный за выпуск зав. кафедрой  
д-р физ.-мат. наук, проф. С.И. Рембеза

Издается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный  
технический университет», 2013

## СОДЕРЖАНИЕ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ, ВЫБОР ВАРИАНТОВ, ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ, ОБЩИЕ ПОЯСНЕНИЯ К ТЕКСТУ ЗАДАНИЙ

**Электроника** – это наука, изучающая явления взаимодействия электронов и других заряженных частиц с электрическими, магнитными и электромагнитными полями, что является физической основой работы электронных приборов и устройств (вакуумных, газоразрядных полупроводниковых и других), используемых для передачи, обработки и хранения информации.

Охватывая широкий круг научно-технических и производственных проблем, электроника опирается на достижения в различных областях знаний. При этом, с одной стороны, электроника ставит перед другими науками и производством новые задачи, стимулируя их дальнейшее развитие, и с другой – снабжает их качественно новыми техническими средствами и методами исследований.

Основными направлениями развития электроники являются: вакуумная, твердотельная и квантовая электроника.

Основными направлениями твердотельной электроники являются: **полупроводниковая электроника**, связанная с разработкой различных видов полупроводниковых приборов, и **микроэлектроника**, связанная с разработкой интегральных схем.

Целями преподавания дисциплины «Физические основы электроники» являются изучение студентами физики электронных процессов в вакууме, газах, твердых телах, на границах раздела сред и принципов построения и работы электронных приборов различного назначения. Дисциплина включает в себя четыре раздела: «Вакуумная и плазменная электроника», «Твердотельная электроника», «Микроэлектроника», «Квантовая и оптическая электроника».

Студенты направления подготовки бакалавров 210100 «Электроника и наноэлектроника», профиля «Микроэлектроника и твердотельная электроника» заочной формы обучения согласно рабочей программе дисциплины «Физические основы электроники» выполняют две контрольных работы. Первая контрольная работа направлена на изучение разделов «Вакуумная и плазменная электроника» и «Твердотельная электроника», а вторая – разделов «Микроэлектроника», «Квантовая и оптическая электроника».

**Микроэлектроника** - современное направление электроники, включающее исследование, конструирование и производство интегральных схем (ИС) и радиоэлектронной аппаратуры на их основе. Основной задачей микроэлектроники является создание микроминиатюрной аппаратуры с высокой надежностью и воспроизводимостью, низким энергопотреблением и высокой функциональной сложностью. Полупроводниковые интегральные схемы (ИС), представляющие собой функционально законченные узлы радиоаппаратуры: логические элементы, усилители, генераторы и др. были разработаны в шестидесятые годы XX столетия. В интегральной микросхеме все или часть элементов нераздельно связаны и электрически соединены между собой так, что устройство рассматривается как единое целое. Это позволяет резко уменьшить размеры функциональных узлов и повысить надежность монтажа. Восьмидесятые и девяностые годы характеризуются бурным развитием микроэлектроники, увеличением функциональной сложности и плотности упаковки элементов в одном полупроводниковом кристалле, то есть разработкой и производством больших и сверхбольших интегральных схем (БИС и СБИС) и микропроцессоров.

**Квантовая электроника** – область науки и техники, исследующая и применяющая квантовые явления для усиления, генерации и преобразования когерентных электромагнитных волн.

**Оптоэлектроника** - это раздел электроники, связанный главным образом с изучением эффектов взаимодействия между электромагнитными волнами оптического диапазона и электронами вещества (преимущественно твердых тел) и охватывающий проблемы создания оптоэлектронных приборов (в основном методами микроэлектронной технологии), в которых эти эффекты используются для генерации, передачи, обработки, хранения и отображения информации.

Успехи квантовой электроники определили новые возможности оптики, приведя к возникновению и быстрому развитию нового направления – оптической электроники. Соединив в себе возможности, как оптики, так и электроники, оптическая электроника способна решать задачи, не посильные по отдельности ни оптике, ни электронике. Появление лазеров, их непрерывное совершенствование и быстрое освоение в промышленном масштабе привело к созданию принципиально новых приборов и методов, их широкому распространению в самых разнообразных областях науки и техники.

Вторая контрольная работа состоит из 7 заданий. Каждое задание имеет десять вариантов. ***Студенты в заданиях №№ 1 – 3 выбирают номер варианта, соответствующий последней цифре номера зачетки, в заданиях №№ 4 – 7 выбирают номер варианта, соответствующий предпоследней цифре номера зачетки.*** Например, если номер зачетки оканчивается числом 72, то выбирается вариант 2 заданий №№ 1 – 3 и вариант 7 заданий №№ 4 – 7.

Контрольная работа выполняется в отдельной тетради. На обложке указывается название дисциплины, фамилия и инициалы студента, номер зачетки, специальность и факультет, домашний адрес и телефон, а также варианты выполняемых заданий. Выполнение каждого задания желательно начинать с новой страницы. На каждой странице следует оставлять поля для замечаний. В заданиях после изложения текста задания указаны разделы учебных пособий, которые могут оказать помощь при их выполнении.

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

**Задание № 1.** Элементы интегральных микросхем. Дайте развернутый ответ на вопрос своего варианта.

Таблица 1

| Вариант | Вопрос                                                                                                                |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0       | Что такое элементы и компоненты интегральных схем? Что такое степень интеграции, плотность упаковки?                  |
| 1       | Какие существуют методы изоляции элементов интегральных микросхем? Поясните метод изоляции <i>p-n</i> -переходом.     |
| 2       | Какие существуют методы изоляции элементов интегральных микросхем? Поясните метод изоляции коллекторной диффузией.    |
| 3       | Какие существуют методы изоляции элементов интегральных микросхем? Поясните метод изоляции диэлектрическими пленками. |
| 4       | Какие существуют методы изоляции элементов интегральных микросхем? Поясните метод полной изоляции                     |
| 5       | Расскажите о методе изоляции типа «кремний на сапфире» (КНС).                                                         |
| 6       | Что такое монокристаллический резистор, тонкопленочный резистор, диффузионный резистор?                               |
| 7       | Что такое пинч-резистор, ионно-легированный резистор?                                                                 |

| Вариант | Вопрос                                                                                     |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 8       | Что такое монолитный конденсатор, тонкопленочный конденсатор, толстопленочный конденсатор? |
| 9       | Что такое диффузионный конденсатор, МДП-конденсатор?                                       |

Рекомендуемая литература: [1], стр. 5 - 43

Основным видом изделий микроэлектроники являются интегральные схемы (микросхемы) (ИМС), которые могут быть квалифицированы по технологии изготовления, степени интеграции, функциональному назначению и по применяемости в аппаратуре.

**Интегральная схема** (микросхема) - микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию преобразования, обработки сигнала, накопления информации и имеющее высокую плотность электрически соединенных элементов (или элементов и компонентов), которые с точки зрения требований к испытаниям, приемке, поставке и эксплуатации рассматриваются как единое целое.

**Элемент** - часть интегральной схемы, реализующая функцию какого-либо электрорадиоэлемента, которая не может быть выделена как самостоятельное изделие. Под радиоэлементом понимают транзистор, диод, резистор, конденсатор и т.п. Элементы могут выполнять и более сложные функции, например, логические (логические элементы) или запоминание информации (элементы памяти).

**Компонент** - часть интегральной схемы, реализующая функцию какого-либо радиоэлемента, которая может быть выделена как самостоятельное изделие. Компоненты устанавливаются

ливаются на подложке микросхемы при выполнении сборочно-монтажных операций. К простым компонентам относятся бескорпусные диоды и транзисторы, специальные типы конденсаторов, малогабаритные катушки индуктивности и др. Сложные компоненты содержат несколько элементов, например, диодные или транзисторные сборки.

Известные способы изоляции между элементами разделяются на два главных типа: изоляция обратным смещенным  $p$ - $n$ -переходом и изоляция диэлектриком.

Способ изоляции элементов в полупроводниковых ИМС, выполненных на основе биполярных структур, во многом определяет как предельно достижимые параметры и характеристики ИМС, так и последовательность технологических операций при их изготовлении. Следует понимать, что в полупроводниковых ИМС на МДП-структурах изоляция между элементами не требуется.

Параметры и характеристики пассивных элементов полупроводниковых ИМС (диффузионных и ионно-легированных резисторов, диффузионных и МДП-конденсаторов) существенно отличаются от соответствующих параметров и характеристик дискретных резисторов и конденсаторов. Необходимо знать их основные отличия от дискретных пассивных компонентов и уметь изобразить простейшие модели (эквивалентные схемы), учитывающие паразитные эффекты. Особое внимание уделите МДП-конденсаторам, широко используемым в самых новейших разработках дискретно-аналоговых МДП БИС. Следует также понимать, что, несмотря на большой разброс номиналов полупроводниковых резисторов и конденсаторов, отношения номиналов в пределах кристалла выдерживаются с достаточно высокой точностью (0,5 – 3 %). При изучении элементов полупроводниковых ИМС усвойте способы изоляции между ними и их особенности.

**Задание № 2.** Биполярные интегральные схемы. Дайте развернутый ответ на вопрос своего варианта.

Таблица 2

| Вариант | Вопрос                                                                                                                                             |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0       | Интегральные транзисторы типа <i>n-p-n</i> . Основные параметры и особенности структуры.                                                           |
| 1       | Поясните появление в структуре интегрального <i>n-p-n</i> -транзистора паразитного <i>p-n-p</i> -транзистора.                                      |
| 2       | Интегральные транзисторы типа <i>p-n-p</i> . Основные параметры и особенности структуры.                                                           |
| 3       | Какие схемы диодного включения транзистора Вы знаете? Поясните структуру интегрального стабилитрона.                                               |
| 4       | Какую роль выполняет диод Шоттки в транзисторе? Как он выполняется конструктивно?                                                                  |
| 5       | Как работает логическая ячейка типа И <sup>2</sup> Л? Какую логическую функцию она выполняет? Способы улучшения параметров И <sup>2</sup> Л-логики |
| 6       | Как работает логическая ячейка типа ЭСЛ? Какую логическую функцию она выполняет?                                                                   |
| 7       | Как работают логические ячейки типа ДТЛ, ТТЛ? Какую логическую функцию они выполняют?                                                              |
| 8       | Что такое дифференциальный усилитель?                                                                                                              |
| 9       | Что такое операционный усилитель?                                                                                                                  |

Рекомендуемая литература: [1], стр. 44 - 70

Основу биполярных полупроводниковых ИМС составляют *n-p-n*-транзисторы. Отличия параметров и характеристик интегрального *n-p-n*-транзистора от дискретного определяют-

ся расположением всех трех выводов на одной поверхности, а также влиянием подложки. Обратите внимание на способы улучшения параметров интегрального  $n$ - $p$ - $n$ -транзистора, в частности, введение скрытого  $n$ -слоя.

Диоды полупроводниковых ИМС реализуются на основе  $n$ - $p$ - $n$ -транзисторов, причем их параметры зависят от схемы включения транзистора в качестве диода.

Обратите внимание на проблему реализации  $p$ - $n$ - $p$ -транзисторов на одной подложке с основными  $n$ - $p$ - $n$ -транзисторами, поймите отличия горизонтального и вертикального  $p$ - $n$ - $p$ -транзисторов. Такие элементы наряду с супер-бета-транзисторами широко используются в полупроводниковых ИМС.

Номенклатура современных аналоговых ИМС обширна и разнообразна по функциональному назначению. Наиболее распространенным типом многофункциональных аналоговых ИМС является *операционный усилитель* (ОУ), с помощью которого возможно выполнение всех аналоговых функций (усиление, сравнение, ограничение, частотная фильтрация, суммирование, интегрирование, дифференцирование и др.).

Важнейшей базовой цепью аналоговых ИМС, в полной мере использующей основные преимущества интегральной технологии, является *дифференциальный каскад* (ДК). Идентичность параметров транзисторов и нагрузочных резисторов в обоих плечах ДК, а также близость расположения элементов на подложке ИМС позволяют обеспечить параметры, недостижимые при использовании дискретных компонентов. Ознакомьтесь с принципом действия и основными параметрами ДК, обратив особое внимание на выражения для коэффициента подавления синфазной составляющей сигнала и коэффициента усиления дифференциальной составляющей сигнала.

Современные интегральные ОУ содержат три каскада: входной, промежуточный и выходной. Входной каскад всегда является дифференциальным каскадом, промежуточный — каскадом сдвига уровня и выходной — эмиттерный повторитель на комплементарных транзисторах.

**Задание № 3.** Интегральные схемы на основе полевых транзисторов. Дайте развернутый ответ на вопрос своего варианта.

Таблица 3

| Вариант | Вопрос                                                                                                      |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0       | Интегральные полевые транзисторы с <i>p-n</i> -переходом. Основные параметры и особенности структуры.       |
| 1       | Интегральные МДП-транзисторы. Основные параметры и особенности структуры                                    |
| 2       | Комплементарные (КМОП) транзисторы. Основные параметры и особенности структуры.                             |
| 3       | Интегральные V-МДП-транзисторы. Основные параметры и особенности структуры.                                 |
| 4       | Особенности схемы и структуры инвертора на КМДП.                                                            |
| 5       | Как формируется логическая ячейка типа И-НЕ на МОП-транзисторе?                                             |
| 6       | Как формируется логическая ячейка типа ИЛИ-НЕ на МОП-транзисторе?                                           |
| 7       | Интегральные полевые транзисторы с барьером Шоттки. Основные параметры и особенности структуры.             |
| 8       | Интегральные полевые транзисторы типа КНИ МДПТ. Основные характеристики и особенности структуры.            |
| 9       | Интегральные полевые транзисторы с ультракоротким каналом. Основные характеристики и особенности структуры. |

Рекомендуемая литература: [1], стр. 71 – 93.

Биполярные транзисторы в ИС все больше вытесняются транзисторами типа МОП (или МДП). Это объясняется важными преимуществами МОП-транзисторов, в частности их высоким входным сопротивлением и простотой устройства. В качестве активных элементов в ИС могут использоваться полевые транзисторы со структурой «металл - диэлектрик (оксид) - полупроводник», то есть МДП-транзисторы или МОП-транзисторы. В соответствии с этим все монолитные ИС разделяются на три основных вида: МДП ИС (МОП ИС), биполярные и биполярно-полевые ИС. МДП ИС могут быть реализованы на транзисторах с каналом  $p$ -типа ( $p$ -МДП ИС,  $p$ -МОП ИС) и каналом  $n$ -типа ( $n$ -МДП ИС,  $n$ -МОП ИС), а также на **комплементарных**, то есть использующих одновременно  $p$ - и  $n$ -типы, МДП-транзисторах (КМДП ИС, КМОП ИС). «Комплементарный» означает «дополняющий» (от англ. complementary). Комплементарные транзисторы применяются в ключевых (цифровых) схемах и отличаются очень малым потреблением тока и высоким быстродействием. Встречаются также ИС, в которых на одном общем кристалле изготовлены биполярные и МОП-транзисторы. Биполярно-полевые ИС представляют собой объединенные в одном кристалле биполярные и КМДП ИС (БиКМДП ИС, БиКМОП ИС).

Необходимо ясно понимать, что важным преимуществом МДП ИМС по сравнению с биполярными ИМС является упрощение технологии изготовления и соответственно больший процент выхода годных изделий и меньшая стоимость. МДП активные элементы занимают значительно меньшую площадь на подложке и позволяют реализовать ИМС с очень высокой степенью интеграции при малой потребляемой мощности. Обратите внимание на устройство и особенности КМДП ИМС, являющихся в настоящее время одним из наиболее перспективных типов ИМС.

**Задание № 4.** Оптическое излучение. Энергетические и световые параметры оптического излучения. Дайте краткий ответ на вопрос своего варианта.

Таблица 4

| Вариант | Вопрос                                          |
|---------|-------------------------------------------------|
| 0       | Оптическое излучение. Оптический диапазон.      |
| 1       | Световые волны. Монохроматическое излучение.    |
| 2       | Энергетические параметры оптического излучения. |
| 3       | Световые параметры оптического излучения.       |
| 4       | Поток излучения (световой поток).               |
| 5       | Сила излучения (сила света).                    |
| 6       | Энергетическая светимость (светимость).         |
| 7       | Энергетическая яркость (яркость).               |
| 8       | Облученность (освещенность).                    |
| 9       | Световая эффективность (или функция видности).  |

Рекомендуемая литература: [2], стр. 8 – 12.

Оптическое излучение - это электромагнитные волны с длиной волны  $\lambda$  от 0,01 до 1000 мкм. По физическим свойствам оптический диапазон волн неоднороден. Поэтому принято оптический диапазон делить на поддиапазоны, в которых физические свойства в определенной степени одинаковы: ультрафиолетовое излучение ( $\lambda = 0,01 - 0,4$  мкм), видимое излучение ( $\lambda = 0,38 - 0,78$  мкм), инфракрасное излучение ( $\lambda = 0,78 - 1000$  мкм). Нас в основном будут интересовать области длин волн от близкой ультрафиолетовой ( $\sim 0,3$  мкм) до близкой инфракрасной ( $\sim 1,5$  мкм).

Оптическое излучение характеризуют фотометрическими параметрами. Различают фотометрические параметры энергетические и световые. *Энергетические параметры* характеризуют излучение безотносительно к его действию на какой-либо приемник излучения и связаны с переносимой излучением энергией. С помощью *световых параметров* оценивают излучение в случае, если приемником излучения служит человеческий глаз.

Таким образом, энергетические и световые параметры излучения по смыслу одинаковы, но характеризуют излучение в различных диапазонах волн и имеют различные единицы измерения.

Для количественного описания оптического излучения, а также источников и приемников излучения используются пять основных энергетических параметров: *поток излучения* и *сила излучения* - параметры, характеризующие излучение; *энергетическая светимость* и *энергетическая яркость* - эти параметры характеризуют источник излучения с учетом площади излучаемой поверхности; *энергетическая освещенность (облученность)* - этим параметром характеризуют облучаемую, т. е. принимающую излучение, поверхность. Для видимого излучения применяются, соответственно пять световых параметров: *световой поток*, *сила света*, *светимость*, *яркость* и *освещенность*.

**Задание № 5.** Внутренний фотоэффект и электролюминесценция в полупроводниках. Дайте краткий ответ на вопрос своего варианта.

Таблица 5

| Вариант | Вопрос                                                                  |
|---------|-------------------------------------------------------------------------|
| 0       | Оптические характеристики вещества                                      |
| 1       | Оптические переходы в полупроводниках.                                  |
| 2       | Оптическое поглощение в кристаллах.                                     |
| 3       | Внутренний фотоэффект, формы его проявления                             |
| 4       | Фотопроводимость полупроводников                                        |
| 5       | Фотоэлектрические эффекты в электрическом переходе                      |
| 6       | Люминесценция. Схемы люминесценции. Виды люминесценции                  |
| 7       | Электролюминесценция                                                    |
| 8       | Гетеропереходы, виды гетеропереходов.                                   |
| 9       | Эффекты в гетеропереходах, определяющие их применение в оптоэлектронике |

Рекомендуемая литература: [2], стр. 13 – 44.

Фотоэффект основан на поглощении фотонов, сопровождающемся квантовыми переходами электронов «вверх» — в направлении увеличения их энергии. Согласно общему физическому принципу обратимости всех процессов переходы электронов «вниз», т. е. в направлении уменьшения их энергии, должны (или, точнее, могут) сопровождаться *генерацией* (испусканием, эмиссией, излучением) **фотонов**. Однако этот процесс значительно чаще, чем фотопроводимость, «смазывается» или полностью «забывается» бесполезной тратой энергии электронов перехода на разогрев полупроводника (возбуждение фононов). Если фотопроводимостью обладают в большей или меньшей степени все полупроводники, то для генерации излучения почти всегда материал должен быть специально подготовлен. Для того чтобы иметь возможность перейти с верхнего уровня на более низкий, электрон предварительно должен быть заброшен на этот верхний уровень. Нередко возбуждение электронов происходит в одном месте кристалла, а их квантовые переходы с испусканием фотонов — в другом (в центрах свечения), поэтому в общем случае процесс излучения включает три этапа:

возбуждение полупроводника внешним воздействием, перевод электронов в зону проводимости или на примесные уровни в запрещенной зоне;

передача энергии возбуждения к центрам свечения, сопровождающаяся изменением пространственного, а часто и энергетического положения возбужденных электронов;

обратный переход электронов в начальное невозбужденное состояние - излучательный переход.

Различают три механизма генерации фотонов: тепловое излучение, люминесценцию и вынужденное излучение.

**Люминесценцией** называется оптическое излучение, возникающее в результате электронного возбуждения материала, в отличие от теплового излучения, обусловленного только тепловым нагревом материала.

**Задание № 6.** Полупроводниковые лазеры и светодиоды.  
 Дайте краткий ответ на вопрос своего варианта.

Таблица 6

| Вариант | Вопрос                                                         |
|---------|----------------------------------------------------------------|
| 0       | Светодиоды, их характеристики и параметры.                     |
| 1       | Требования к материалам для светодиодов                        |
| 2       | Базовые конструкции светодиодов видимого диапазона.            |
| 3       | Базовые конструкции ИК-светодиодов                             |
| 4       | Общая характеристика и особенности полупроводниковых лазеров.  |
| 5       | Полупроводниковые лазеры с электронной и оптической накачкой.  |
| 6       | Инжекционные ДГС-лазеры.                                       |
| 7       | Полосковые лазеры.                                             |
| 8       | Гетеролазеры с раздельным электронным и оптическим излучением. |
| 9       | Гетеролазеры с распределенной обратной связью.                 |

Рекомендуемая литература: [2], стр. 45 – 76; стр. 105 – 141.

**Светодиоды** – полупроводниковые источники некогерентного оптического излучения, принцип действия которых основан на явлении электролюминесценции при инжекции неосновных носителей заряда через гомо- или гетеро- *p-n*-переход. Как правило, светодиоды работают в спектральном диапазоне 0,4 – 1,6 мкм. Приборы излучающие в видимом диапазоне, принято называть **светоизлучающим диодом** – СИД. Они используются как индикаторы для отображения информации, а также как малоинерционные источники света для генерации световых импульсов малой длительности. Приборы, излучающие в ближней инфракрасной области спектра, принято называть **ИК-светодиодами**. Они предназначены для работы в качестве источников излучения различного рода оптоэлектронных устройствах, в системах автоматического контроля, в датчиках, в системах накачки, ИК - подсветки.

Светодиоды работают при пропускании через них тока в прямом направлении. За счет инжекции электронов в *p*-область, а дырок в *n*-область вблизи *p-n*-перехода создается неравновесное распределение носителей заряда. В светодиоде важно обеспечить такие условия, чтобы рекомбинация инжектированных носителей заряда происходила излучательным путем.

Оптическое излучение люминесцирующего полупроводника представляет собой суперпозицию электромагнитных волн, излучаемых большим числом возбужденных атомов. Если каждый атом излучает независимо от остальных так, что значения параметров частоты, фазы, а также направления поляризации различны для всех излучающих атомов, то имеет место некогерентное излучение. Оно является хаотическим, многочастотным и характеризуется только интенсивностью (амплитудой), не имеет строгой направленности.

Если же колебания всех излучающих атомов протекают согласованно во времени, то есть значения параметров часто-

ты, фазы и направления поляризации для всех атомов одинаковы, то имеет место когерентное излучение.

В современной оптоэлектронике источниками когерентного излучения являются только лазеры. Лазерное излучение исключительно направленно и монохроматично.

**Лазер** — источник когерентного во времени и в пространстве электромагнитного излучения оптического диапазона, основанный на использовании вынужденного излучения атомов и молекул.

**Полупроводниковый лазер** — это излучающий полупроводниковый прибор, предназначенный для непосредственного преобразования электрической энергии или энергии некогерентного излучения в энергию когерентного излучения.

В лазерах или в оптических квантовых генераторах (ОКГ) излучение, как и в светоизлучающих диодах, порождается рекомбинацией электронов и дырок. Однако эта рекомбинация в лазерах оказывается в основном не самопроизвольной, а вынужденной (стимулированной). Именно поэтому источники вынужденного излучения называли лазерами. *Laser — lightwave amplification by stimulated emission of radiation* (усиление световых волн с помощью стимулированного излучения). Излучение при вынужденной рекомбинации получается когерентным, что является принципиальным отличием полупроводниковых лазеров от светоизлучающих диодов. Явление вынужденной рекомбинации дает возможность управлять излучением возбужденных атомов полупроводника с помощью электромагнитных волн и таким образом усиливать и генерировать когерентный свет.

Инжекционный лазер представляет собой полупроводниковый двухэлектродный прибор с *p-n*-переходом (поэтому часто как равноправный используется термин лазерный диод), в котором генерация когерентного излучения связана с инжекцией носителей заряда при протекании прямого тока через *p-n*-переход.

**Задание № 7. Фотоприемники.** Дайте краткий ответ на вопрос своего варианта.

Таблица 7

| Вариант | Вопрос                                                                             |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 0       | Фотодиоды. Устройство и принцип действия.                                          |
| 1       | Фотодиоды. Основные характеристики и параметры                                     |
| 2       | Лавинные фотодиоды.                                                                |
| 3       | <i>p-i-n</i> -фотодиоды.                                                           |
| 4       | Биполярный фототранзистор. Устройство и принцип действия.                          |
| 5       | Биполярный фототранзистор. Основные параметры и характеристики.                    |
| 6       | Полевой фототранзистор. Устройство и принцип действия.                             |
| 7       | Фототиристоры. Устройство и принцип действия.                                      |
| 8       | Фототиристоры. Основные параметры и характеристики.                                |
| 9       | Фоторезисторы. Устройство и принцип действия. Основные параметры и характеристики. |

Рекомендуемая литература: [2], стр. 172 – 200.

**Фоторезисторы** – полупроводниковые фотоприемники, которые изменяют сопротивление в зависимости от интенсивности и спектрального состава падающего на них светового излучения. Они широко применяются в системах автоматики и фототелеграфии.

**Фотодиод** – это полупроводниковый диод на основе  $p$ - $n$ -перехода или барьера металл–полупроводник, обратный ток которого зависит от воздействующего на него светового излучения. Действие фотодиода основано на поглощении света вблизи области  $p$ - $n$ -перехода, при этом кванты света, разрушая ковалентные связи атомов полупроводника, создают новые носители заряда (электронно-дырочные пары). Эффективное поглощение света происходит на границе раздела областей с противоположными типами проводимости одного и того же полупроводника, вблизи контакта двух различных полупроводников (фотодиоды с гетеропереходом, например,  $n$  – AlGaAs,  $p$  – GaAs) или металла и полупроводника.

**Фототранзистором** называют транзистор (обычно биполярный), в котором управление коллекторным током осуществляется на основе внутреннего фотоэффекта.

Фототранзистор, как правило, включается по схеме с общим эмиттером, в базе которого при освещении генерируются парные заряды (электроны и дырки). Образующиеся неосновные носители в базе (например, дырки для  $p$ - $n$ -транзистора) втягиваются полем коллекторного перехода; оставшиеся в базе электроны создают дополнительный пространственный заряд, снижающий высоту потенциального барьера эмиттерного перехода. Поэтому число диффундируемых из эмиттера в базу, а затем в коллектор основных носителей (в частности для  $p$ - $n$ -транзистора дырок) возрастает, увеличивая коллекторный ток. Величина коллекторного тока, как и в обычном транзисторе, включенном по схеме с ОЭ, в  $\beta$  раз будет больше тока базы затемненного фототранзистора, так и тока, создаваемого под действием светового потока.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Свистова Т.В. Микроэлектроника: учеб. пособие / Т.В. Свистова. Воронеж: ВГТУ, 2011. 129 с.
2. Свистова Т.В. Введение в оптоэлектронику: учеб. пособие / Т.В. Свистова. Воронеж: ВГТУ, 2009. 228 с.
3. Аваев Н.А. Основы микроэлектроники / Н.А. Аваев, Ю.Е. Наумов, В.Т. Фролкин. М., 1991.
4. Ефимов И.Е. Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надежность: учеб. пособие / И.Е. Ефимов, И.Я. Козырь, Ю.И. Горбунов. М.: Высш. шк., 1986.
5. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника / А.Н. Пихтин. М.: Высш. шк., 2001, 573 с.
6. Носов Ю.Р. Оптоэлектроника / Ю.Р. Носов. М.: Радио и связь, 1989. 360 с.
7. Щука А.А. Электроника: учеб. пособие / под ред. А.С. Ситова. – СПб: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению контрольной работы № 2 по дисциплине  
«Физические основы электроники»  
для студентов направления подготовки бакалавров  
210100 «Электроника и наноэлектроника»,  
профиля «Микроэлектроника и твердотельная электроника»  
заочной формы обучения

Составитель  
Свистова Тамара Витальевна

В авторской редакции

Подписано к изданию 10.10.2013

Уч.-изд. л. 1,2.

Объем данных 1,28 Мб.

ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный  
технический университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14