

С. А. Миленина

ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА

УЧЕБНИК И ПРАКТИКУМ ДЛЯ СПО

Под редакцией Н. К. Миленина

2-е издание, переработанное и дополненное

*Рекомендовано Учебно-методическим отделом
среднего профессионального образования в качестве учебника
и практикума для студентов образовательных учреждений
среднего профессионального образования*

**Книга доступна в электронной библиотечной системе
biblio-online.ru**

Москва ■ Юрайт ■ 2019

УДК 621.3(075.32)

ББК 31.2я723

М60

Автор:

Миленина Светлана Александровна — доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры вычислительной техники Института информационных технологий Московского технологического университета (МИРЭА).

Ответственный редактор:

Миленин Николай Кириллович — кандидат технических наук, доцент.

Рецензенты:

Николаев С. С. — доктор технических наук, профессор Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана;

Одинокоев В. В. — доктор технических наук, профессор Рязанского государственного радиотехнического университета.

Миленина, С. А.

М60

Электроника и схемотехника : учебник и практикум для СПО / С. А. Миленина ; под ред. Н. К. Миленина. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2019. — 270 с. — (Серия : Профессиональное образование).

ISBN 978-5-534-06085-0

В учебнике большое внимание уделено свойствам и характеристикам полупроводниковых элементов, а также их применению при схемной реализации основных электронных устройств. Отдельные главы посвящены схемотехнике цифровых устройств. Рассмотрены основные принципы построения программируемых логических устройств и микропроцессоров. Обозначены основные наиболее перспективные направления развития электронной базы. В конце каждой главы учебника содержатся контрольные вопросы и задания. Их цель — направить студента по наиболее рациональному пути при изучении материала учебника. Этому же способствуют домашние расчетные задания и методические рекомендации по их выполнению, помещенные в дополнительном разделе «Практикум».

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования и профессиональным требованиям.

Для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования, обучающихся по техническим специальностям.

УДК 621.3(075.32)

ББК 31.2я723



Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

ISBN 978-5-534-06085-0

© Миленина С. А., 2014

© Миленина С. А., 2017, с изменениями

© ООО «Издательство Юрайт», 2019

Оглавление

| | |
|---|-----------|
| Предисловие | 9 |
| Глава 1. Полупроводниковые диоды..... | 11 |
| 1.1. Основные свойства p - n -перехода и полупроводникового диода..... | 11 |
| 1.2. Выпрямительные диоды..... | 13 |
| 1.3. Стабилитроны..... | 14 |
| 1.4. Варикапы..... | 18 |
| 1.5. Фотодиоды, светодиоды, оптроны..... | 19 |
| 1.6. Диоды Шоттки..... | 21 |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> | 22 |
| Глава 2. Биполярные и полевые транзисторы. Тиристоры..... | 24 |
| 2.1. Принцип устройства и виды биполярных транзисторов | 24 |
| 2.2. Вольт-амперные характеристики биполярного транзистора при включении по схеме с общим эмиттером | 25 |
| 2.3. Полевые транзисторы. Общий принцип действия | 27 |
| 2.4. Полевые транзисторы с управляющим p - n -переходом и их вольт-амперные характеристики | 27 |
| 2.4.1. Семейство выходных характеристик..... | 28 |
| 2.4.2. Стокозатворная (передаточная) характеристика | 29 |
| 2.5. Полевые транзисторы с изолированным затвором | 30 |
| 2.5.1. Полевые транзисторы со встроенным каналом..... | 30 |
| 2.5.2. Полевые транзисторы с индуцированным каналом..... | 31 |
| 2.6. Составные транзисторы. Схема Дарлингтона..... | 32 |
| 2.7. Тиристоры. Структурные особенности и основные виды | 33 |
| 2.7.1. Принцип действия динистора и его характеристики | 33 |
| 2.7.2. Тринистор..... | 35 |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> | 36 |
| Глава 3. Электронные усилители | 38 |
| 3.1. Главные рабочие параметры и характеристики усилителя..... | 38 |
| 3.1.1. Понятия рабочей точки и ее окрестности..... | 39 |
| 3.1.2. Понятие коэффициента усиления..... | 39 |
| 3.1.3. Понятия входного и выходного сопротивлений усилителя | 40 |
| 3.1.4. Частотная характеристика усилителя..... | 40 |
| 3.2. Усилитель напряжения низкой частоты на биполярном транзисторе. Методика расчета основных параметров | 41 |
| 3.2.1. Постановка задачи..... | 41 |
| 3.2.2. Расчет режима в рабочей точке | 43 |
| 3.2.3. Расчет коэффициента усиления по напряжению | 44 |
| 3.2.4. Расчет входного и выходного сопротивлений усилителя..... | 45 |
| 3.2.5. Способы задания рабочей точки (смещения) | 45 |
| 3.2.6. Режимы «А», «В», «АВ»..... | 47 |
| 3.2.7. Разделительные цепи | 48 |

| | |
|---|----|
| 3.3. Повторитель напряжения на биполярном транзисторе – эмиттерный повторитель (схема с общим коллектором)..... | 48 |
| 3.3.1. Коэффициент передачи по напряжению эмиттерного повторителя..... | 49 |
| 3.3.2. Входное и выходное сопротивления повторителя | 50 |
| 3.4. Усилители на полевых транзисторах | 51 |
| 3.4.1. Методика расчета основных параметров усилителя низкой частоты на полевом транзисторе с управляющим <i>p-n</i> -переходом | 51 |
| 3.4.2. Особенности задания рабочей точки | 52 |
| 3.4.3. Определение положения рабочей точки на стокзатворной характеристике | 53 |
| 3.4.4. Положение рабочей точки на семействе выходных характеристик..... | 53 |
| 3.4.5. Расчет коэффициента усиления..... | 54 |
| 3.4.6. Выходное сопротивление..... | 54 |
| 3.5. Повторитель напряжения на полевом транзисторе (истоковый повторитель). Методика расчета основных параметров | 55 |
| 3.5.1. Определение рабочей точки на стокзатворной характеристике | 56 |
| 3.5.2. Коэффициент передачи по напряжению | 56 |
| 3.5.3. Выходное сопротивление | 56 |
| 3.6. Усилители с обратной связью..... | 57 |
| 3.6.1. Способы получения сигнала обратной связи | 57 |
| 3.6.2. Способы введения сигнала обратной связи | 58 |
| 3.6.3. Усилитель, охваченный последовательной отрицательной обратной связью по напряжению..... | 58 |
| 3.6.4. Усилитель с большим коэффициентом усиления, охваченный отрицательной обратной связью по напряжению..... | 59 |
| 3.6.5. Достоинства отрицательной обратной связи | 59 |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> | 59 |

Глава 4. Дифференциальный и операционный усилители61

| | |
|--|----|
| 4.1. Дифференциальный усилитель. Методика расчета основных параметров..... | 61 |
| 4.1.1. Структурные особенности схемы дифференциального усилителя | 61 |
| 4.1.2. Расчет базовой цепи в режиме покоя | 62 |
| 4.1.3. Расчет коллекторной цепи в режиме покоя..... | 63 |
| 4.1.4. Синфазная и дифференциальная составляющие входного сигнала..... | 63 |
| 4.1.5. Реакция дифференциального усилителя на синфазное воздействие .. | 64 |
| 4.1.6. Реакция дифференциального усилителя на дифференциальное воздействие | 64 |
| 4.1.7. Коэффициент усиления для дифференциальной составляющей входного сигнала..... | 65 |
| 4.1.8. Входное и выходное сопротивления для дифференциальной составляющей входного сигнала | 65 |
| 4.1.9. Инвертирующий и неинвертирующий входы дифференциального усилителя | 66 |
| 4.2. Основные свойства операционного усилителя..... | 66 |
| 4.2.1. Условное обозначение операционного усилителя | 66 |
| 4.2.2. Особенности передаточной характеристики реального операционного усилителя..... | 67 |
| 4.2.3. Взаимодействие операционного усилителя с внешней цепью..... | 68 |
| 4.3. Методы расчета цепей, содержащих операционный усилитель | 69 |
| 4.4. Расчет по мгновенным значениям..... | 70 |
| 4.4.1. Инвертирующий и неинвертирующий источники напряжения, управляемые напряжением..... | 70 |
| 4.4.2. Повторитель напряжения | 71 |

| | |
|--|------------|
| 4.4.3. Схема дифференцирования | 71 |
| 4.4.4. Схема интегрирования | 72 |
| 4.5. Операторный метод расчета переходного процесса в цепи с операционным усилителем | 73 |
| 4.6. Применение символического метода..... | 74 |
| 4.7. Активные фильтры..... | 76 |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> | 77 |
| Глава 5. Электронные генераторы. Автогенераторы гармонических колебаний ... | 79 |
| 5.1. Электронные генераторы | 79 |
| 5.1.1. Классификация электронных генераторов | 79 |
| 5.2. Структура автогенератора гармонических колебаний..... | 80 |
| 5.3. Условие существования установившихся колебаний | 80 |
| 5.4. LC-автогенератор..... | 81 |
| 5.4.1. Процесс установления колебаний..... | 81 |
| 5.4.2. Расчет амплитуды автоколебаний..... | 82 |
| 5.5. RC-автогенератор | 84 |
| 5.5.1. Основное требование к цепи обратной связи | 84 |
| 5.5.2. Принцип работы RC-автогенератора..... | 85 |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> | 87 |
| Глава 6. Генераторы релаксационных колебаний | 88 |
| 6.1. Генератор прямоугольных импульсов на операционном усилителе — мультивибратор | 88 |
| 6.1.1. Структурные особенности схемы мультивибратора | 89 |
| 6.1.2. Принцип работы | 90 |
| 6.2. Ждущий мультивибратор (одновибратор) | 92 |
| 6.3. Генератор пилообразного напряжения на операционном усилителе | 93 |
| 6.4. Мультивибратор на биполярных транзисторах | 95 |
| 6.4.1. Главные особенности схемы мультивибратора | 96 |
| 6.4.2. Неустойчивость стационарного режима | 96 |
| 6.4.3. Квазиустойчивый режим работы мультивибратора..... | 98 |
| 6.5. Триггер | 102 |
| 6.5.1. Статический режим | 103 |
| 6.5.2. Режим «опрокидывания» | 103 |
| 6.5.3. Простейшая запоминающая ячейка | 104 |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> | 104 |
| Глава 7. Источники вторичного электропитания | 106 |
| 7.1. Источники первичного электропитания..... | 106 |
| 7.2. Источники вторичного электропитания, их структура и назначение основных блоков..... | 107 |
| 7.3. Выпрямители | 108 |
| 7.3.1. Однофазные выпрямители | 108 |
| 7.3.2. Трехфазный выпрямитель | 110 |
| 7.3.3. Коэффициент пульсации..... | 110 |
| 7.4. Сглаживающие фильтры | 111 |
| 7.4.1. Пассивные сглаживающие фильтры | 112 |
| 7.4.2. Активный сглаживающий фильтр на биполярном транзисторе | 114 |
| 7.5. Стабилизаторы напряжения | 116 |
| 7.5.1. Компенсационный стабилизатор напряжения непрерывного действия..... | 116 |
| 7.5.2. Импульсный стабилизатор напряжения | 118 |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> | 121 |

| | |
|--|------------|
| Глава 8. Логические основы цифровых электронных устройств | 123 |
| 8.1. Цифровое устройство и его таблица истинности | 123 |
| 8.2. Алгебраическая запись логической функции, выполняемой цифровым устройством | 124 |
| 8.2.1. Простейшие логические операции и их алгебраическая запись | 124 |
| 8.2.2. Основные законы и теоремы алгебры логики | 125 |
| 8.2.3. Условное изображение устройств, реализующих простейшие логические действия, и их таблицы истинности | 126 |
| 8.3. Две канонические формы алгебраической записи логической функции..... | 127 |
| 8.3.1. Методика получения СДНФ | 127 |
| 8.3.2. Методика получения СКНФ | 127 |
| 8.4. Минимизация логических функций..... | 129 |
| 8.4.1. Постановка задачи. Способы минимизации..... | 129 |
| 8.4.2. Минимизация по формулам алгебры логики | 130 |
| 8.5. Универсальные базисы..... | 130 |
| 8.5.1. Операции «ИЛИ-НЕ», «И-НЕ» | 131 |
| 8.5.2. Универсальность функций «ИЛИ-НЕ» и «И-НЕ» | 131 |
| 8.6. Методика записи и структурной реализации логических функций в универсальных базисах «И-НЕ» и «ИЛИ-НЕ» | 132 |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> | <i>135</i> |
| | |
| Глава 9. Схемная реализация логических функций..... | 137 |
| 9.1. Ключевые схемы. Позитивная и негативная логики..... | 137 |
| 9.2. Инвертор на биполярном транзисторе | 138 |
| 9.3. Транзистор Шоттки..... | 140 |
| 9.4. Особенности схемы простейшего инвертора на полевом транзисторе..... | 141 |
| 9.5. Инвертор на комплементарных полевых транзисторах | 141 |
| 9.6. Схематоры | 143 |
| 9.7. Схемная реализация универсальных базисов «И-НЕ» и «ИЛИ-НЕ»..... | 144 |
| 9.8. Диодно-транзисторная логика..... | 145 |
| 9.9. Транзисторно-транзисторная логика..... | 147 |
| 9.10. Универсальные базисы на КМОП-транзисторах (КМОП-логика) | 149 |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> | <i>151</i> |
| | |
| Глава 10. Схемотехника цифровых устройств, не содержащих элементов памяти | 153 |
| 10.1. Аналого-цифровые преобразователи | 153 |
| 10.1.1. Дискретизация во времени | 154 |
| 10.1.2. Квантование по уровню | 154 |
| 10.1.3. Кодирование | 155 |
| 10.1.4. Способы распознавания уровня преобразуемого сигнала внутри интервала дискретизации | 155 |
| 10.1.5. Аналого-цифровые преобразователи последовательного счета..... | 156 |
| 10.1.6. Аналого-цифровые преобразователи параллельного типа | 158 |
| 10.2. Цифро-аналоговые преобразователи | 158 |
| 10.2.1. Основные соотношения..... | 158 |
| 10.2.2. Структурные составляющие цифро-аналогового преобразователя..... | 159 |
| 10.2.3. Цифро-аналоговый преобразователь с двоично-взвешенной резистивной матрицей | 160 |
| 10.2.4. Цифро-аналоговые преобразователи с матрицей $R - 2R$ | 161 |
| 10.3. Дешифраторы | 162 |
| 10.4. Шифраторы | 164 |
| 10.5. Мультиплексоры | 166 |

| | |
|--|------------|
| 10.6. Демультимплексоры | 167 |
| 10.7. Одноразрядные двоичные сумматоры..... | 168 |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> | 171 |
| Глава 11. Цифровые устройства с памятью | 173 |
| 11.1. Триггеры..... | 173 |
| 11.1.1. Асинхронные <i>RS</i> -триггеры | 174 |
| 11.1.2. Синхронный <i>RS</i> -триггер..... | 176 |
| 11.1.3. <i>D</i> -триггер | 177 |
| 11.1.4. <i>T</i> -триггер (счетный) на основе <i>D</i> -триггера..... | 178 |
| 11.1.5. Триггеры типа <i>M-S</i> | 178 |
| 11.2. Счетчики и регистры | 181 |
| 11.2.1. Счетчики | 181 |
| 11.2.2. Регистры сдвига..... | 183 |
| 11.3. Оперативные запоминающие устройства | 185 |
| 11.3.1. Статические оперативные запоминающие устройства | 185 |
| 11.3.2. Динамические оперативные запоминающие устройства | 187 |
| 11.4. Постоянные запоминающие устройства..... | 189 |
| 11.5. Программируемые логические устройства..... | 190 |
| 11.5.1. Программируемые логические матрицы | 190 |
| 11.5.2. Программируемые логические интегральные схемы и устройства | 194 |
| 11.6. Микропроцессоры..... | 196 |
| 11.7. Перспективные направления развития элементной базы сверхбольших интегральных схем..... | 198 |
| 11.7.1. Повышение степени интеграции и снижение энергопотребления сверхбольших интегральных схем | 198 |
| 11.7.2. Фотоэлектронные преобразователи «свет — сигнал» на основе приборов с зарядовой связью..... | 200 |
| 11.7.3. Фотодиодные матрицы с координатной адресацией | 203 |
| 11.7.4. Основные способы преобразования цветного изображения в электрические сигналы с помощью фотодиодных матриц и матриц ПЗС | 204 |
| 11.7.5. Матричные преобразователи «сигнал — свет»..... | 206 |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> | 209 |

Практикум ЗАДАНИЯ ДЛЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

| | |
|--|------------|
| Задание П1. Расчет стационарного режима в цепях, содержащих полупроводниковые диоды | 212 |
| П1.1. Постановка задачи | 212 |
| П1.2. Пример расчета | 213 |
| П1.3. Исходные данные..... | 215 |
| П1.4. Предлагаемые для расчета схемы | 216 |
| П1.5. Вольт-амперные характеристики полупроводниковых диодов и стабилитронов..... | 218 |
| П1.6. Вопросы на защиту выполненного задания | 220 |
| Задание П2. Расчет усилителей низкой частоты на биполярных и полевых транзисторах..... | 222 |
| П2.1. Постановка задачи | 222 |
| П2.2. Примеры расчета..... | 223 |
| П2.3. Исходные данные..... | 230 |

| | |
|--|------------|
| П2.4. Предлагаемые для расчета схемы | 231 |
| П2.5. Семейства вольт-амперных характеристик биполярных и полевых транзисторов | 233 |
| П2.6. Вопросы на защиту выполненного задания | 236 |
| Задание П3. Расчет установившегося синусоидального режима в цепях, содержащих операционные усилители..... | 240 |
| П3.1. Постановка задачи | 240 |
| П3.2. Примеры расчета..... | 240 |
| П3.3. Исходные данные..... | 247 |
| П3.4. Предлагаемые для расчета схемы | 248 |
| П3.5. Вопросы на защиту выполненного задания | 250 |
| Задание П4. Расчет переходных процессов в цепях, содержащих операционные усилители | 253 |
| П4.1. Постановка задачи..... | 253 |
| П4.2. Примеры расчета..... | 253 |
| П4.3. Исходные данные..... | 261 |
| П4.4. Предлагаемые для расчета схемы | 262 |
| П4.5. Вопросы на защиту выполненного задания | 263 |
| <i>Литература к практикуму.....</i> | <i>265</i> |
| Заключение | 266 |
| Литература | 267 |
| Новые издания по дисциплине «Электротехника, электроника и схемотехника» и смежным дисциплинам | 269 |

Предисловие

Учебник для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования «Электроника и схемотехника» относится к базовой части профессионального цикла дисциплин направления подготовки «Информатика и вычислительная техника». Он соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту среднего образования.

В основу учебника положены материалы курсов лекций, читаемых автором в МГТУ «МИРЭА» по дисциплинам «Теоретические основы электротехники», «Электротехника и электроника» и «Электротехника, электроника и схемотехника», которая включена в учебный план подготовки как базовый курс вместо первых двух дисциплин.

Учебник подается с позиций теории линейных и нелинейных электрических цепей как продолжение и воплощение ее методов. Теоретическое изложение иллюстрируется практическими примерами по расчету наиболее важных для инженерной практики электронных схем и схемотехнических устройств, содержащих полупроводниковые диоды, стабилитроны, биполярные и полевые транзисторы. Рассмотрены такие схемотехнические устройства, как электронные и операционные усилители, электронные генераторы, триггеры, источники вторичного электропитания, базовые логические элементы, АЦП, ЦАП, ОЗУ, ПЗУ и другие функциональные узлы цифровой техники. Излагаются основные принципы построения программируемых пользователем логических матриц и устройств, в том числе СБИС программируемых логических интегральных схем и микропроцессоров.

Процесс преподавания курса «Электроника и схемотехника» включает три вида аудиторных занятий: лекции, семинары и лабораторные работы. Именно на семинарах и в лаборатории, а также при выполнении специально разработанного комплекса домашних расчетных заданий, охватывающих важнейшие разделы курса, студентом приобретаются профессиональные навыки и умения. Причем лабораторные исследования могут проводиться не только на стендах с реальными элементами, но и на компьютерных моделях.

В результате изучения дисциплины студент должен освоить:

трудовые действия

- владение методикой составления технических требований к схемотехническим устройствам;
- владение навыками работы с электротехнической аппаратурой и электронными устройствами;

необходимые умения

- рассчитывать рабочие параметры аналоговых и цифровых устройств;
- ставить и решать схемотехнические задачи, связанные с выбором элементной базы при заданных требованиях к параметрам аналоговых и цифровых устройств (быстродействие, потребляемая мощность, надежность);

необходимые знания

- основные свойства и характеристики различных полупроводниковых элементов (приборов) и типовых схем с их использованием;
- принципы работы и параметры наиболее известных аналоговых и цифровых схемотехнических устройств.

Автор выражает глубочайшую благодарность Почетному радисту России, кандидату технических наук, доценту Николаю Кирилловичу Миленину, взявшему на себя не только нелегкий труд научного редактора рукописи учебника, но и всю предварительную работу при подготовке ее к изданию.

Автор благодарит рецензентов доктора технических наук, профессора МГТУ им. Н. Э. Баумана Сергея Сергеевича Николаева, доктора технических наук, профессора РГРУ Валерия Федоровича Одинокова, а также технического редактора Павла Александровича Макарова за внимательное прочтение рукописи, ценные советы и замечания.

Глава 1

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

В результате изучения данной главы студент должен:

знать

- основные свойства p - n -перехода и особенности его вольт-амперной характеристики;
- особенности вольт-амперных характеристик германиевых и кремниевых диодов;

уметь

- выбрать тип диода, обладающего характеристиками, удовлетворяющими поставленной задаче;

владеть

- навыками применения методов теории нелинейных резистивных цепей для схем с полупроводниковыми диодами.

1.1. Основные свойства p - n -перехода и полупроводникового диода

Полупроводниковый диод — это прибор с двумя выводами, содержащий один p - n -переход и два контактных вывода. **p - n -Переход** представляет собой тонкий слой между двумя полупроводниковыми областями, одна из которых обладает дырочным типом проводимости, а другая — электронным (рис. 1.1). Металлический контакт с p -областью называют **анодом (А)**, с n -областью — **катодом (К)**.

Напомним, что для получения дырочной проводимости к основному полупроводнику (например, четырехвалентному кремнию) добавляется трехвалентная примесь (алюминий, индий, галлий, бор), называемая **акцептором** [14]. Примесь обладает способностью забирать электрон у соседнего атома кремния и прочно его удерживать, превратившись в отрицательный ион (неподвижный в пространстве). В теле основного полупроводника воз-

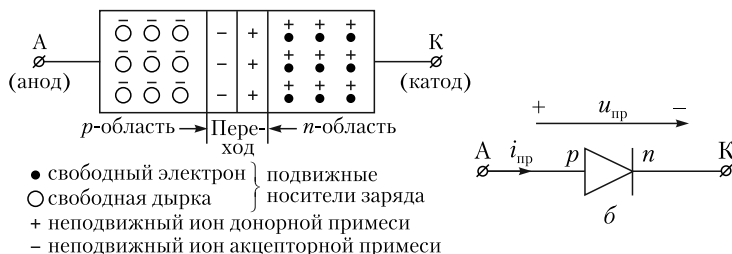


Рис. 1.1. Полупроводниковый диод:

а — p - n -структура; б — условное обозначение

никают «пустые места», не занятые электронами, — дырки, способные в пространстве перемещаться (выполняют функции подвижных зарядов положительного знака).

Электронная проводимость возникает при добавлении к четырехвалентному кремнию пентавалентной примеси (фосфор, сурьма, мышьяк). Пятый электрон во внешней оболочке атома примеси слабо удерживается, легко ее покидает и может свободно перемещаться в кристаллической решетке полупроводника, являясь подвижным зарядом отрицательного знака. При этом атом примеси становится положительно заряженным ионом (неподвижным).

Плоскость соприкосновения *p*- и *n*-областей называется **металлургической границей**.

Ввиду различной концентрации подвижных носителей заряда (дырок и электронов) в соприкасающихся областях в районе металлургической границы наблюдается перепад концентрации дырок и электронов, а следовательно, и диффузионные силы. Причиной возникновения диффузионных сил является градиент концентрации dp/dx и dn/dx , где x — пространственная координата. Под их действием дырки устремляются в *n*-область, а электроны — в *p*-область.

На границе областей с *p*-стороны обнажаются неподвижные отрицательные ионы акцепторной примеси, а с *n*-стороны — положительно заряженные неподвижные ионы донорной примеси. Два заряженных слоя обуславливают возникновение сил электрической природы, препятствующих дальнейшему перемещению электронов и дырок, т.е. направленных противоположно диффузионным силам.

При отсутствии внешнего напряжения устанавливается состояние равновесия между диффузионными силами и силами электрического происхождения. Движение носителей заряда прекращается. При отсутствии внешнего напряжения через переход ток не течет.

Область, занятая заряженными слоями, почти не содержащая подвижных носителей заряда, называется **полупроводниковым переходом**, а ее ширина — **шириной перехода**.

Если внешний источник электрического напряжения подключить «плюсом» к *p*-области, а «минусом» — к *n*-области, то созданное им внешнее электрическое поле направлено встречно внутреннему и частично его компенсирует. Другими словами, имеет место частичная компенсация сил, препятствующих процессу диффузии. Прежнее равновесие нарушается, диффузионные силы начинают превалировать над силами электрического притяжения и отталкивания. Через переход начинают проникать подвижные носители заряда (дырки — в *n*-область, а электроны — в *p*-область). Возникает электрический ток, направленный из *p*-области в *n*-область. Его называют **прямым**. Прямым называют и внешнее напряжение, приложенное «плюсом» к *p*-области, а «минусом» — к *n*-области.

Таким образом, прямой ток имеет диффузионные природу и направление (из *p*-области в *n*-область).

Внешнее напряжение, приложенное «минусом» к аноду, создает поле, согласное с внутренним электрическим полем, и они вместе противодействуют диффузионным силам. Область, занятая заряженными слоями (обед-

ненная подвижными носителями заряда) становится шире, переход расширяется. Под действием суммарного электрического поля происходит процесс выдирания малочисленных дырок из n -области и электронов из p -области, называемый **экстракцией**. Во внешней цепи протекает незначительный ток (ток экстракции).

Вывод. Полупроводниковый диод обладает односторонней проводимостью. Это справедливо до той поры, пока обратное напряжение не достигнет величины напряжения пробоя. Причем сначала возникает режим электрического пробоя, переходящий с незначительным ростом обратного напряжения в режим теплового пробоя, когда прибор сгорает.

Изложенный физический процесс лежит в основе работы всех полупроводниковых диодов.

По функциональному назначению выпускаемые промышленностью диоды подразделяются следующим образом: 1) выпрямительные; 2) стабилитроны; 3) варикапы; 4) диоды Шоттки; 5) фотодиоды; 6) светодиоды; 7) оптроны и др. [9, Н.11, 12].

1.2. Выпрямительные диоды

В работе выпрямительных диодов главным является их свойство односторонней проводимости. Поскольку обратный ток диода несоизмерим с прямыми токами, вольт-амперную характеристику (ВАХ) выпрямительного диода при прямых и обратных напряжениях часто изображают в разных масштабах. Для примера на рис. 1.2, *а*, *б* представлены ВАХ германиевого и кремниевое диодов.

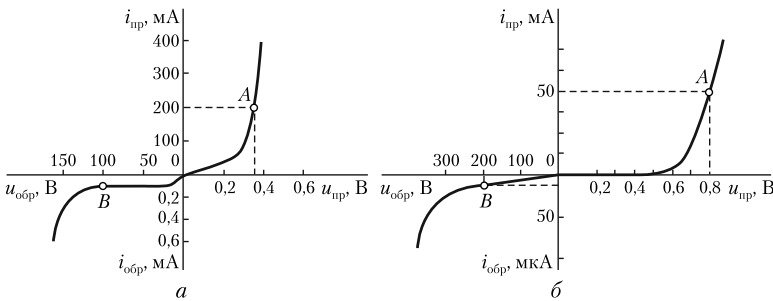


Рис. 1.2. ВАХ полупроводниковых диодов:

а – германиевого (D7B); *б* – кремниевое (D208)

При расчете схем с выпрямительными диодами с целью упрощения пренебрегают прямым падением напряжения на самом диоде и обратным током через диод, считая их равными нулю. При этом ВАХ диода идеализируется в виде двух отрезков прямых, совпадающих с осями i и u . В прямом направлении диод проявляет себя как к.з., а в обратном – как обрыв (рис. 1.3, *а*).

На рис. 1.3, *б*, *в* изображены ВАХ двухполюсников, содержащих идеальный диод и линейный резистор. Расчет наиболее распространенных выпрямительных схем с полупроводниковыми диодами рассмотрен в гл. 7.

Основные параметры выпрямительных диодов, приводимые в справочниках, таковы:

1) наибольшее допустимое значение постоянного тока, который может протекать через диод в прямом направлении;

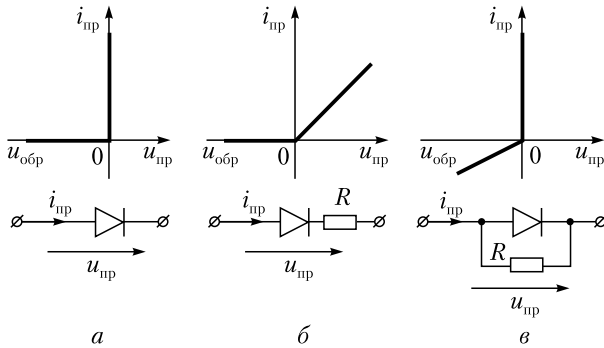


Рис. 1.3. ВАХ простейших цепей с идеальным диодом:

a — идеализированная ВАХ диода; *б* — ВАХ последовательного соединения диода и линейного резистора; *в* — ВАХ параллельного соединения диода и линейного резистора

2) наибольшее среднее за период значение прямого тока (при работе в пульсирующем режиме);

3) наибольшее допустимое значение обратного напряжения, не приводящее к пробое диода. Мощные диоды, выпускаемые промышленностью, рассчитаны на обратное напряжение до 1000 В и могут пропускать токи до сотен ампер.

1.3. Стабилитроны

Полупроводниковый **стабилитрон** (рис. 1.4, *a*) — это диод, у которого в рабочем режиме используется обратная ветвь его ВАХ (рис. 1.4, *б*), причем на участке, соответствующем электрическому пробое.

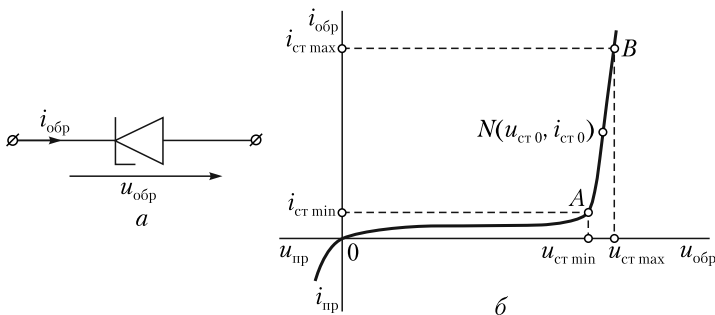


Рис. 1.4. Полупроводниковый стабилитрон:

a — условное изображение; *б* — ВАХ стабилитрона

Различают два вида пробоя полупроводникового диода:

1) электрический пробой, не приводящий к выходу прибора из строя, когда после снятия обратного напряжения диод возвращается в исходное состояние;

2) тепловой пробой (прибор сгорает).

Электрический пробой возникает под действием сильного обратного электрического поля. При этом наиболее энергичные электроны разгоняются до скорости, достаточной для выбивания электронов из нейтральных атомов. В свою очередь, освобожденные электроны также приобретают очень

высокую скорость. Этот процесс принимает лавинообразный характер и ведет к резкому нарастанию обратного тока (на несколько порядков).

Тепловой пробой. Значительный рост обратного тока вызывает увеличение температуры диода, а следовательно, дополнительную генерацию электронно-дырочных пар, способствующую дальнейшему росту тока. Возникает новый лавинообразный процесс, называемый тепловым пробоем. Во избежание перехода электрического пробоя в тепловой величина обратного тока не должна превышать некоторого наибольшего допустимого значения $i_{ст\max}$. Другими словами, мощность, рассеиваемая на диоде, не должна быть больше допустимой величины.

Важнейшей особенностью рассматриваемого полупроводникового прибора в режиме электрического пробоя является малое дифференциальное сопротивление. Это равносильно наличию на его ВАХ участка, где большим изменениям тока соответствуют очень малые изменения напряжения. На рис. 1.4, б это режимы между точками А и В (участок стабилизации).

Основные параметры стабилитронов, приводимые в справочниках:

1) напряжение стабилизации $u_{ст0}$ (соответствует примерно середине участка стабилизации — точка N на рис. 1.4, б). Режим, определяемый точкой $N(u_{ст0}, i_{ст0})$, называется номинальным;

2) минимальный ток $i_{ст\min}$, при котором наблюдается устойчивый электрический пробой. Этой величиной задается нижняя граница участка стабилизации (точка А на рис. 1.4, б);

3) максимально допустимый ток стабилизации $i_{ст\max}$, при котором рассеиваемая на диоде мощность не приводит к переходу электрического пробоя в тепловой (точка В на рис. 1.4, б, определяющая верхнюю границу участка стабилизации);

4) дифференциальное сопротивление прибора в режиме стабилизации (номинальном).

Полупроводниковые стабилитроны выполняют на основе кремния. У германиевых диодов электрический пробой легко переходит в тепловой, поэтому для изготовления стабилитронов германий не используется. Кремниевые стабилитроны, выпускаемые промышленностью, рассчитаны на напряжение стабилизации от 5 до 400 В и мощностью от 250 мВт до 50 Вт.

Схема простейшего стабилизатора напряжения со стабилитроном изображена ниже на рис. 1.5, а. Это четырехполюсник, включенный между источником входного напряжения и сопротивлением нагрузки. Сопротивление R_0 , называемое **балластным** или **ограничительным**, выполняет две функции:

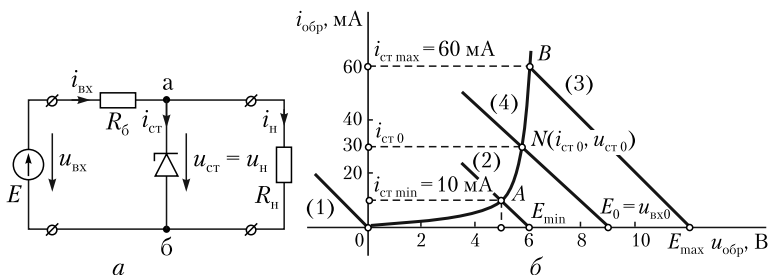


Рис. 1.5. Стабилитрон:

а — схема стабилизатора напряжения; б — ее графический расчет для случая $R_n = \infty$

1) ограничивает ток через стабилитрон, что предотвращает переход электрического пробоя в тепловой;

2) принимает на себя «излишки» напряжения, возникающие при изменении напряжения питания и сопротивления нагрузки.

Обеспечиваемое схемой стабилизатора качество стабилизации оценивается по величине коэффициента стабилизации $K_{ст}$:

$$K_{ст} = \frac{\text{Относительное изменение выходного напряжения}}{\text{Относительное изменение входного напряжения}} = \frac{\Delta u_{н}/u_{н0}}{\Delta u_{вх}/u_{вх0}},$$

где $u_{н0}$ и $u_{вх0}$ соответствуют номинальному режиму (точка N на рис. 1.4, б).

Пример 1.1. Для стабилизатора постоянного напряжения (рис. 1.5, а) известны: величина балластного сопротивления $R_0 = 100$ Ом; ВАХ стабилитрона (задана графически на рис. 1.5, б). Координаты крайних точек участка стабилизации A и B , а также точки N , соответствующей номинальному режиму: точка $A - u_{ст\min} = 5$ В, $i_{ст\min} = 10$ мА; точка $B - u_{ст\max} = 6,1$ В, $i_{ст\max} = 60$ мА; точка $N - u_{ст0} = 5,8$ В, $i_{ст0} = 30$ мА.

Определить, в каких пределах может изменяться напряжение на входе, обеспечиваемое источником ЭДС E , чтобы напряжение на нагрузке соответствовало участку стабилизации AB на ВАХ стабилитрона. Рассмотреть два случая: 1) $R_n \gg R_0$ (принять $R_n \rightarrow \infty$); 2) $R_n = 400$ Ом. Для $R_n = 400$ Ом вычислить коэффициент стабилизации $K_{ст}$.

Решение

Случай 1. Графический способ. При $R_n \rightarrow \infty$ источник входного напряжения E , сопротивление R_0 и стабилитрон включены последовательно. Режим нелинейного элемента определяется точкой пересечения его ВАХ и прямой $u = E - iR_0$. Ее наклон не зависит от величины E .

Поэтому на рис. 1.5, б построена прямая (1) по уравнению $u = -iR_0$. Прямые (2) и (3) проведены через крайние точки участка стабилизации A и B параллельно прямой (1). Отрезки, отсекаемые прямыми (2) и (3) по оси напряжения, определяют соответственно минимальное E_{\min} и максимальное E_{\max} значения входного напряжения. Таким образом:

$$u_{вх\min} = E_{\min} = 6 \text{ В}; \quad u_{вх\max} = E_{\max} = 12 \text{ В}.$$

Аналитический способ. Для нижней границы участка стабилизации (точка A):

$$i_{ст\min} = 10 \text{ мА}; \quad u_{ст\min} = 5 \text{ В};$$

$$E_{\min} = u_{ст\min} + i_{ст\min} R_0 = 5 + 10 \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 6 \text{ (В)}.$$

Для верхней границы участка стабилизации (точка B):

$$i_{ст\max} = 60 \text{ мА}; \quad u_{ст\max} = 6,1 \text{ В};$$

$$E_{\max} = u_{ст\max} + i_{ст\max} R_0 = 6,1 + 60 \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 12,1 \text{ (В)}.$$

Случай 2 ($R_n = 400$ Ом). Графический способ. По отношению к стабилитрону остальная схема является линейным активным двухполюсником. На рис. 1.6, а изображена его последовательная схема замещения, включающая источник ЭДС и линейный резистор. Для нее:

$$u_{xx} = E \frac{R_n}{R_n + R_0}; \quad R_{вх} = \frac{R_n R_0}{R_n + R_0}.$$

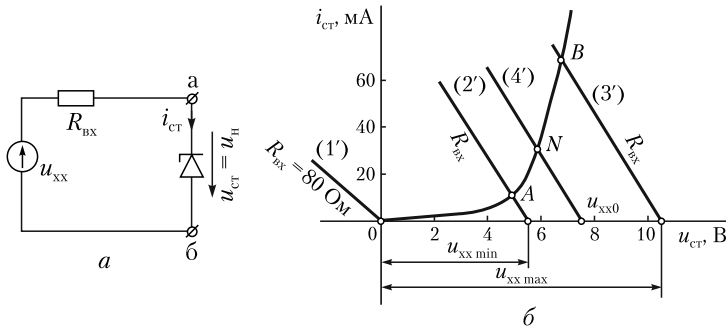


Рис. 1.6. Расчет стабилизатора напряжения для случая $R_n = 400 \text{ Ом}$:

a — эквивалентная схема для расчета режима стабилизатора;
б — ее графический расчет

По условию задачи величина R_{bx} неизменна и равна

$$R_{bx} = \frac{400 \cdot 100}{400 + 100} = 80 \text{ Ом.}$$

Величина $u_{xx} = E \frac{400}{400 + 100} = 0,8E$ — изменяется при изменении E .

Графическое решение для этого случая аналогично предыдущему и приведено на рис. 1.6, б. Прямая (1') на рис. 1.6, б построена по уравнению $u = -iR_{bx}$, где $R_{bx} = 80 \text{ Ом}$. Прямые (2') и (3') проведены параллельно прямой (1') через точки *A* и *B* на ВАХ стабилизатора. По отрезкам, отсекаемым прямыми (2') и (3') на оси напряжения, находим $u_{xx \min} = 5,5 \text{ В}$; $u_{xx \max} = 11 \text{ В}$.

Из соотношения, связывающего величины E и u_{xx} , получаем

$$E = u_{xx}(R_n + R_0)/R_n = u_{xx}/0,8;$$

$$E_{\min} = u_{bx \min} = u_{xx \min}/0,8 \approx 7 \text{ В};$$

$$E_{\max} = u_{bx \max} = u_{xx \max}/0,8 \approx 13,85 \text{ В.}$$

Номинальный режим обеспечивается при

$$u_{xx0} \approx 7,5 \text{ В}; \quad u_{bx0} = E_0 = \frac{u_{xx0}}{0,8} \approx 9,4 \text{ В.}$$

Величина u_{xx0} определена по отрезку, отсекаемому на оси напряжений прямой (4'), проведенной через точку *N* на рис. 1.6, б.

Коэффициент стабилизации равен

$$K_{ct} = \frac{\Delta u_{ct}/u_{ct0}}{\Delta u_{bx}/u_{bx0}} = \frac{(u_{ct \max} - u_{ct \min})/u_{ct0}}{(u_{bx \max} - u_{bx \min})/u_{bx0}} = \frac{(6,1 - 5)/5,8}{(13,85 - 7)/9,4} \approx 0,28.$$

Аналитический способ. Нижняя граница участка стабилизации (точка *A*):

$$u_{n \min} = u_{ct \min} = 5 \text{ В}; \quad i_{n \min} = \frac{u_{n \min}}{R_n} = \frac{5}{400} = 12,5 \cdot 10^{-3} \text{ А};$$

$$E_{\min} = u_{n \min} + (i_{n \min} + i_{ct \min})R_0 = 5 + (12,5 + 10) \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 7,25 \text{ В.}$$

Верхняя граница участка стабилизации (точка *B*):

$$u_{n \max} = u_{ct \max} = 6,1 \text{ В}; \quad i_{n \max} = \frac{u_{ct \max}}{R_n} = 15,3 \cdot 10^{-3} \text{ А};$$

$$E_{\max} = u_{n \max} + (i_{n \max} + i_{ct \max})R_0 = 6,1 + (15,3 + 60) \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 6,1 + 7,53 = 13,63 \text{ В.}$$

Пример 1.2. Цепь на рис. 1.5, *a* питается от источника постоянной ЭДС $E = \text{const} = 16 \text{ В}$. В каких пределах может изменяться сопротивление нагрузки, чтобы напряжение на нагрузке, поддерживаемое стабилитроном, не выходило за пределы участка стабилизации на ВАХ стабилитрона (рис. 1.5, *б*).

Решение

Хотя графический путь решения поставленной задачи возможен, аналитический способ здесь представляется более целесообразным (менее трудоемок).

Нижняя граница участка стабилизации (точка *A*):

- ток через балластное сопротивление

$$i_{\text{вх}A} = (E - u_{\text{ст min}}) \frac{1}{R_0} = \frac{16 - 5}{100} = 110 \text{ мА};$$

- ток через сопротивление нагрузки

$$i_{\text{н}A} = i_{\text{вх}A} - i_{\text{ст min}} = 100 \text{ мА};$$

- соответствующее сопротивление нагрузки

$$R_{\text{н}A} = \frac{u_{\text{н}A}}{i_{\text{н}A}} = \frac{u_{\text{ст min}}}{i_{\text{н}A}} = \frac{5}{100} \cdot 10^3 = 50 \text{ Ом}.$$

Верхняя граница участка стабилизации (точка *B*):

$$i_{\text{вх}B} = (E - u_{\text{ст max}}) \frac{1}{R_0} = \frac{16 - 6,1}{100} = 99 \text{ мА};$$

$$i_{\text{н}B} = i_{\text{вх}B} - i_{\text{ст}B} = 99 - 60 = 39 \text{ мА};$$

$$R_{\text{н}B} = \frac{u_{\text{н}B}}{i_{\text{н}B}} = \frac{6,1}{39} \cdot 10^3 \approx 150 \text{ Ом}.$$

Ответ: $R_{\text{н min}} = 50 \text{ Ом}; R_{\text{н max}} = 150 \text{ Ом}.$

1.4. Варикапы

Полупроводниковый переход (рис. 1.7, *б*) наряду с резистивными свойствами обладает еще и емкостными. Поэтому в общем случае схема замещения полупроводникового диода (рис. 1.7, *в*) содержит включенные параллельно резистивный и емкостной элементы (нелинейные). Причем зависимость

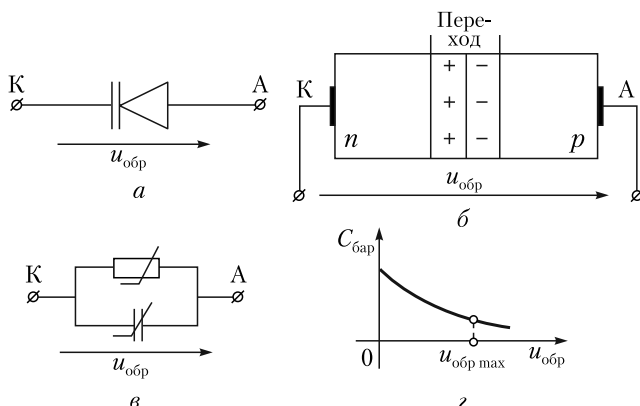


Рис. 1.7. Варикап:

a — условное изображение; *б* — структура прибора; *в* — схема замещения; *z* — вольт-фарадная характеристика (графическое обозначение)

$i(u)$ для нелинейного резистора совпадает с ВАХ диода. Напомним, что емкость как параметр элемента связывает величины приращения накопленного заряда Δq с соответствующим приращением напряжения Δu : $C \approx \Delta q / \Delta u$.

Известно, что физические процессы накопления заряда в p - n -структуре при прямом и обратном напряжениях различны.

Обратное напряжение (рис. 1.7, б). Резистивное сопротивление при обратном напряжении можно принять равным ∞ . Поэтому запертый диод уподобляется конденсатору. Его пластинами являются p -область и n -область, а переход (свободный от подвижных носителей заряда) выполняет функции диэлектрика.

Емкость запертого диода называется **барьерной** и обозначается $C_{\text{бар}}$. Поскольку с ростом обратного напряжения на диоде ширина p - n -перехода увеличивается (что можно трактовать как раздвижение пластин конденсатора), то барьерная емкость уменьшается. Таким образом, $C_{\text{бар}}$ зависит от обратного напряжения $u_{\text{обр}}$ и уменьшается с его ростом.

Зависимость $C_{\text{бар}}(u_{\text{обр}})$ называется **вольт-фарадной характеристикой**. Ее качественный вид показан на рис. 1.7, г.

Варикапом называется полупроводниковый прибор, в работе которого используются емкостные свойства полупроводникового перехода при обратном напряжении питания, т.е. его барьерная емкость $C_{\text{бар}}$. Условное изображение варикапа приведено на рис. 1.7, а.

В справочниках приводятся следующие параметры варикапов:

- а) номинальная емкость (соответствующая некоторому обратному напряжению, принятому за номинал) и пределы ее изменения;
- б) максимально допустимое обратное напряжение (во избежание обратного пробоя).

Варикапы применяются, например, для настройки колебательных контуров в радиоаппаратуре.

Прямое напряжение. В общем случае эквивалентная схема p - n -перехода, а значит, и полупроводникового диода при прямом напряжении должна учитывать как резистивные, так и емкостные свойства. Поскольку при прямых напряжениях процессы перемещения и накопления заряда происходят в основном под действием диффузионных сил, соответствующая емкость называется **диффузионной** и обозначается как $C_{\text{дифф}}$.

Для медленно протекающих процессов диод можно считать нелинейным резистором. Его ВАХ совпадает с прямой ветвью ВАХ диода. С ростом частоты влияние емкостных свойств становится все более существенным, т.е. диффузионную емкость $C_{\text{дифф}}$ необходимо учитывать.

1.5. Фотодиоды, светодиоды, оптроны

Фотодиод — это полупроводниковый диод, у которого создана возможность воздействия оптического излучения на область p - n -перехода. На рис. 1.8, а поясняется принцип работы прибора, а на рис. 1.8, б представлено его условное обозначение.

Луч света (поток фотонов), направленный перпендикулярно плоскости p - n -перехода, вызывает в поверхностном слое генерацию электронно-дырочных пар. Следовательно, концентрация электронов и дырок на поверхности становится больше, чем во внутренних областях. Возникают диффу-

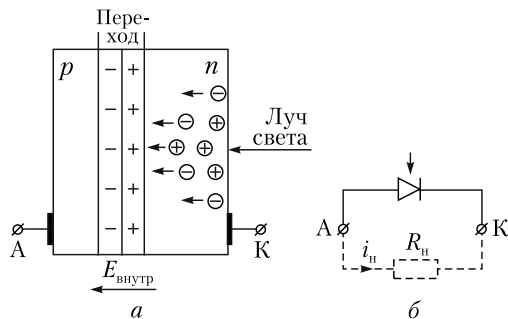


Рис. 1.8. Фотодиод:

a — принцип работы прибора; *б* — условное изображение

сионные силы, направленные внутрь полупроводника, благодаря которым подвижные носители зарядов обоих знаков устремляются к *p-n*-переходу.

Попадая в область перехода, электроны и дырки оказываются в различных условиях: дырки подхватываются внутренним полем и направляются в *p*-область, заряжая ее положительно; электроны задерживаются внутренним полем, заряжая *n*-область отрицательно.

Таким образом, *p-n*-переход выполняет функции разделения зарядов, как и в любом источнике электрической энергии. Если между электродами диода (анодом и катодом) включить сопротивление нагрузки, то через него будет протекать ток, имеющий для самого диода обратное направление (см. рис. 1.8, б). Этот ток зависит от интенсивности светового потока и при его отсутствии равен нулю.

Итак, фотодиод — это преобразователь светового сигнала в электрический. Известные нам солнечные батареи являются фотодиодами с большой площадью поверхности, воспринимающей солнечное излучение.

Режимом в нагрузке можно дополнительно управлять, включив последовательно с ней ЭДС смещения.

Светодиоды — это полупроводниковые диоды, способные генерировать оптическое излучение при протекании через них прямого тока. Условное изображение светодиода дано на рис. 1.9, *a*. По сравнению с лампами накаливания светодиоды имеют более узкий спектр излучения, требуют меньшего напряжения питания и обладают более высоким КПД.

Таким образом, светодиод — это преобразователь электрического сигнала $e_c(t)$ в световой. Для получения высококвотвительного преобразователя необходимо, чтобы его исходное состояние (при отсутствии преобразуемого электрического сигнала $e_c(t)$) соответствовало крутому участку прямой ветви ВАХ диода. Это обеспечивается подбором величины ЭДС смещения $E_{см}$ (рис. 1.9, б).

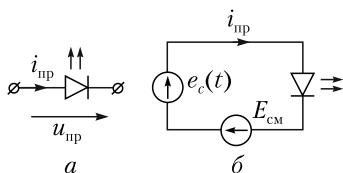


Рис. 1.9. Светодиод:

a — условное изображение; *б* — схема включения

Изготавливают светодиоды на основе *арсенида-фосфида галлия* (германий и кремний не используются).

В настоящее время разработан новый вид светодиодов на основе органических соединений, обладающих полупроводниковыми свойствами. Применение органических светодиодов (англ. *organic light-emitting diode*, OLED) для создания мониторов и дисплеев представляется весьма перспективным [20, 25].

Оптрон — это пара светодиод-фотодиод, помещенная в одном корпусе, причем так, что светочувствительная площадка фотодиода располагается против излучающей площадки светодиода (рис. 1.10).

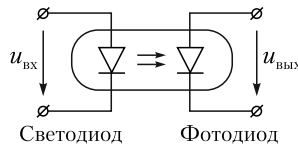


Рис. 1.10. Принцип построения оптрона

Поскольку передача сигнала здесь происходит через оптическое излучение, входная и выходная цепи не имеют гальванического контакта. Поэтому оптроны могут использоваться в электронной аппаратуре для развязки входной и выходной цепей.

1.6. Диоды Шоттки

Диоды Шоттки являются разновидностью диодов, в которых используется выпрямляющее действие перехода между металлом и полупроводником.

Рассмотрим вариант перехода между металлом и полупроводником n -типа. В этом случае обязательным условием для используемого металла является следующее: работа выхода электронов для металла существенно больше, чем для полупроводника. Под работой выхода понимается энергия, необходимая для перевода электрона из валентной зоны в зону проводимости, т.е. работа отрыва электрона от нейтрального атома, чтобы электрон стал свободно перемещаться по кристаллической решетке.

В полупроводнике n -типа достаточно много свободных электронов, способных перемещаться. Разница в работах выхода электронов приводит к возникновению диффузионных сил, под действием которых происходит процесс преобладающего перемещения электронов из n -полупроводника в металл.

В результате в районе металлургической границы образуется слой металла, заряженный отрицательно, и слой полупроводника, заряженный положительно (это неподвижные ионы донорной примеси, отдавшие электроны).

Наличие двух заряженных слоев обуславливает электрическое поле $E_{внутр}$, противодействующее диффузионным силам и ограничивающее дальнейший процесс ухода электронов в металл. Переходный слой по выпрямляющему действию аналогичен p - n -переходу. На металл здесь возлагается функции p -области. Электрод, контактирующий с металлом, является анодом, а с n -полупроводником — катодом.

На рис. 1.11, *а* приведено условное обозначение диода Шоттки, а на рис. 1.11, *б* показана структура такого прибора. ВАХ перехода металл — по-

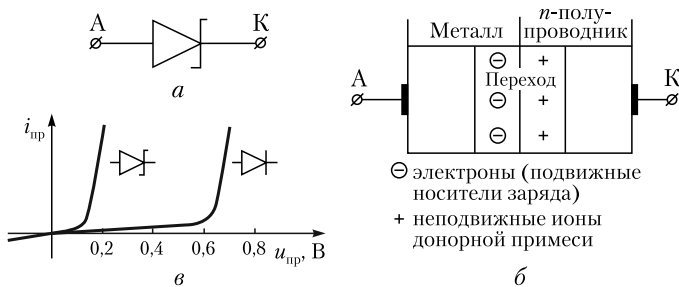


Рис. 1.11. Диод Шоттки:

a – условное обозначение; *б* – структура прибора;
в – ВАХ диода Шоттки и обычного выпрямительного диода

лупроводник, показанная на рис. 1.11, *в*, подобна ВАХ *p-n*-перехода. Основное ее отличие — значительно меньшее прямое падение напряжения, примерно 0,2–0,3 В вместо 0,7–0,8 В для *p-n*-перехода.

Важным достоинством диода Шоттки является его высокое быстродействие. При скачкообразном изменении напряжения возникающий переходный процесс в нем протекает значительно быстрее, чем у *p-n*-диодов, и составляет доли наносекунды. Рабочая частота диода Шоттки может достигать нескольких гигагерц. Диоды Шоттки могут быть малой, средней и большой мощности. Мощные диоды Шоттки позволяют пропускать токи в десятки ампер и выдерживают обратное напряжение до 500 В.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение понятиям «*p-n*-переход» и «полупроводниковый диод».
2. Как подключить к электродам полупроводникового диода источник напряжения, чтобы создать режимы протекания: а) прямого тока $i_{пр}$ и б) обратного тока $i_{обр}$? Под действием каких сил (диффузионных или электрических) обеспечивается протекание токов $i_{пр}$ и $i_{обр}$? Что понимается под током экстракции?
3. Нарисуйте вольт-амперную характеристику (ВАХ) реального и идеального полупроводниковых диодов.
4. Постройте ВАХ диодной сборки (рис. 1.12), содержащей десять диодов, если ВАХ каждого из них имеет вид, представленный на рис. 1.2, б.

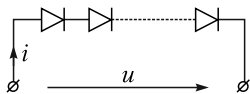


Рис. 1.12. К заданию 4

5. Назовите основные параметры, характеризующие выпрямительные диоды.
6. Дайте определение полупроводниковому стабилитрону. Каковы основные отличия режимов электрического пробоя и теплового пробоя? Почему для использования стабилитронов не используется германий?
7. Каковы главные особенности ВАХ стабилитрона?
8. Нарисуйте схему простейшего стабилизатора напряжения на стабилитроне. Каковы функции элементов этой схемы?
9. Получите ВАХ $i(u)$ двухполюсника, содержащего два встречно включенных и одинаковых стабилитрона (рис. 1.13), если ВАХ каждого из них соответствует рис. 1.4.

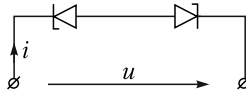


Рис. 1.13. К заданию 9

10. Нарисуйте простейшую схему замещения полупроводникового диода, учитывая его резистивные и емкостные свойства.
11. Какой прибор называется варикапом? Нарисуйте его условное изображение на схемах. Назовите основные параметры, характеризующие варикап.
12. Какой полупроводниковый прибор называют фотодиодом?
13. Поясните процесс разделения электрических зарядов, происходящий в солнечной батарее под воздействием луча света.
14. Какого направления (прямого или обратного) будет протекать ток через фотодиод при световом воздействии, если к его зажимам подключить резистор R_H ?
15. Сформулируйте определение прибора, называемого светодионом. На основе каких полупроводниковых материалов изготавливаются светодиоды?
16. Какой прибор называется оптроном? Какова основная функция оптрона, входящего в состав некоторого электронного устройства?
17. Каковы структурные особенности диода Шоттки? Назовите основные требования к металлу в конструкции диода Шоттки, если он контактирует: а) с n -полупроводником; б) с p -полупроводником?
18. Назовите главные особенности ВАХ диода Шоттки при сравнении с ВАХ кремниевого выпрямительного диода.
19. В каком частотном диапазоне используются диоды Шоттки?
20. Определите ток i , протекающий в диоде цепи на рис. 1.14, а, если $I_K = 1$ мА, $R = 0,5$ кОм, а ВАХ диода соответствует рис. 1.14, б. Рекомендуется воспользоваться методикой, изложенной в параграфе 2.6.

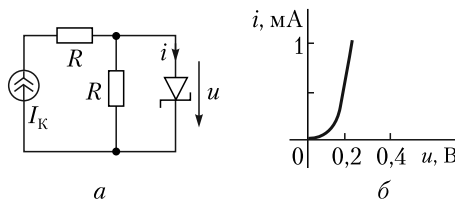


Рис. 1.14. К заданию 20

Глава 2

БИПОЛЯРНЫЕ И ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ. ТИРИСТОРЫ

В результате изучения данной главы студент должен:

знать

- принцип работы, основные свойства и особенности вольт-амперных характеристик разных видов биполярных и полевых транзисторов, схемы их включения и главные параметры;

- устройство тиристора, его виды и вольт-амперные характеристики;

уметь

- рассчитывать главные параметры биполярных и полевых транзисторов по заданным вольт-амперным характеристикам;

владеть

- навыками в определении вида транзистора по его условному изображению на схеме.

2.1. Принцип устройства и виды биполярных транзисторов

Биполярный транзистор — полупроводниковый прибор, содержащий два p - n -перехода, образованные тремя слоями полупроводника с чередующимся типом проводимости. В транзисторе вида n - p - n между двумя n -областями лежит p -область. В транзисторе вида p - n - p две p -области разделены n -слоем.

Крайние области называются **эмиттер** (Э) и **коллектор** (К), а средняя область получила название **база** (Б). Переходы, образованные базой с эмиттером и коллектором, называют эмиттерно-базовый (ЭБ) и коллекторно-базовый (КБ).

Обычно к переходу ЭБ прикладывается прямое напряжение, а к переходу КБ — обратное. При такой полярности напряжений основные для эмиттера носители движутся от эмиттера к базе. Обратный поток (из базы в эмиттер) хотя и существует, но он гораздо меньше по причине меньшей концентрации примесей в базе (по сравнению с эмиттером).

Базовый слой имеет толщину порядка долей микрона. Поэтому лишь небольшая часть зарядов, инжектированных эмиттером, поступает во внешнюю ветвь, соединяющую базу с эмиттером, и составляет базовый ток. Основной поток этих зарядов подхватывается электрическим полем обратно смещенного КБ перехода. Через КБ переход начинает протекать обратный ток. Его величина прямо зависит от тока эмиттера и составляет примерно 95—98% от тока эмиттера, т.е.

$$i_{\text{К}} = i_{\text{Э}} - i_{\text{Б}} = \alpha i_{\text{Э}}, \quad (2.1)$$

где $\alpha = 0,95 \div 0,98$ — коэффициент передачи тока эмиттера.

На рис. 2.1 показаны структуры $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторов (а, в) и их условные графические обозначения, для краткости названные изображениями (б, г). Полезно помнить, что на условном изображении транзистора (рис. 2.1, б, г) стрелка направлена из p -области в n -область. Кружок вокруг транзистора означает, что прибор изготовлен в собственном корпусе, а его отсутствие свидетельствует о том, что собственного корпуса транзистор не имеет, являясь элементом интегральной микросхемы. Обращаем внимание, что в схемах с $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторами приняты определенные положительные направления для токов в ветвях, подключенных к электродам базы, эмиттера и коллектора. Именно они приведены на рис. 2.1. Там же показаны традиционные полярности источников, обеспечивающих необходимые напряжения на обоих переходах транзисторов.

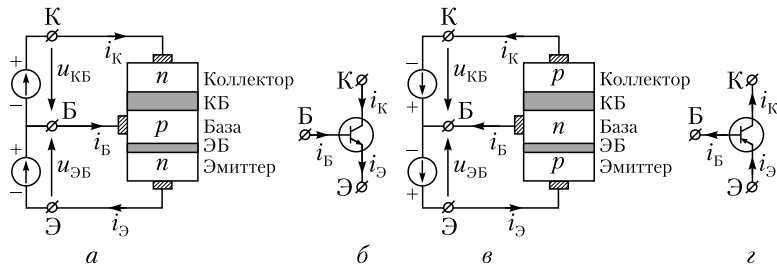


Рис. 2.1. Биполярный транзистор:

а — структура $n-p-n$ -транзистора; б — его условное изображение;
 в — структура $p-n-p$ -транзистора; г — его условное изображение

Биполярный транзистор представляет собой трехполюсник, так как имеет три вывода, контактирующих с эмиттером, базой и коллектором.

Любое устройство, предназначенное для преобразования электрического сигнала, предполагает наличие двух выводов для входного сигнала и двух — для выходного, т.е. является четырехполюсником. Поэтому один из выводов транзистора раздваивается и становится *общим* по отношению к входной и выходной цепям.

Различают схемы: 1) с общей базой (ОБ); 2) с общим эмиттером (ОЭ); 3) с общим коллектором (ОК). Схема с ОЭ применяется чаще.

2.2. Вольт-амперные характеристики биполярного транзистора при включении по схеме с общим эмиттером

При включении по схеме с ОЭ (рис. 2.2) транзистор задается входной характеристикой и семейством выходных характеристик.

Входная ВАХ. Она представляет собой зависимость тока базы i_B от напряжения между базой и эмиттером $u_{БЭ}$ при фиксированном напряжении между коллектором и эмиттером: $i_B = i_B(u_{БЭ})$ при $u_{КЭ} = \text{const}$.

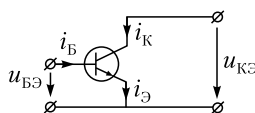


Рис. 2.2. Включение биполярного транзистора по схеме с общим эмиттером

Если полярность и величина напряжения $u_{кэ}$ соответствует запертому состоянию КБ-перехода, то входная ВАХ (рис. 2.3, а) мало зависит от величины $u_{кэ}$ (незначительно смещается вправо с ее ростом).

Семейство выходных ВАХ. Выходными характеристиками транзистора являются зависимости $i_к = i_к(u_{кэ})$ при $i_б = \text{const}$ (показаны на рис. 2.3, б). На каждой кривой семейства выходных ВАХ можно выделить *пологий участок* (приближающийся к горизонтальному), где ток $i_к$ слабо зависит от напряжения $u_{кэ}$. Соответствующий режим принято называть *активным*.

Начальный (крутой) участок каждой кривой соответствует напряжению $u_{кэ}$, соизмеримым с напряжением $u_{бэ}$ и даже меньшим. При этом переход коллектор — база начинает открываться. Транзистор вступает в режим, называемый состоянием *насыщения*.

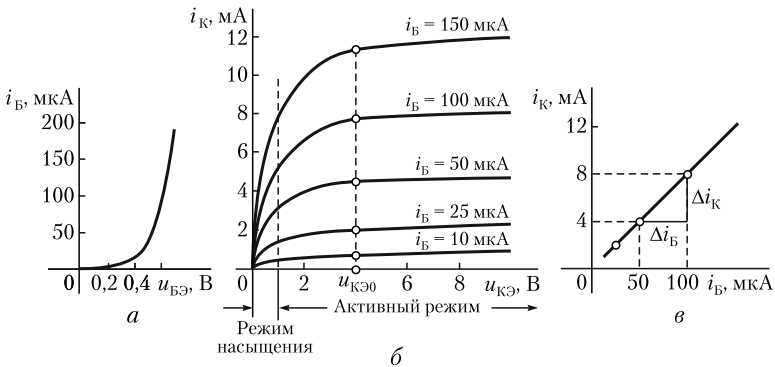


Рис. 2.3. Характеристики биполярного транзистора при включении по схеме с ОЭ:

а — входная ВАХ; б — семейство выходных ВАХ; в — передаточная характеристика

Передаточная характеристика транзистора. Под передаточной характеристикой понимается зависимость тока коллектора $i_к$ от тока базы $i_б$ при фиксированном напряжении между коллектором и эмиттером: $i_к = i_к(i_б)$ при $u_{кэ} = \text{const}$, где обычно предполагается, что величина и полярность $u_{кэ}$ обеспечивают активный режим работы транзистора.

Передаточная характеристика может быть снята экспериментально или найдена по известному семейству выходных характеристик. С этой целью на графике выходных ВАХ проводится вертикаль, соответствующая выбранному значению $u_{кэ} = u_{кэ0}$, как это показано на рис. 2.3, б. Каждая точка пересечения этой вертикали с одной из кривых семейства выходных ВАХ дает совокупность величин $i_к$ и $i_б$, что позволяет по нескольким таким точкам построить требуемую зависимость (приведена на рис. 2.3, в). Вид передаточной характеристики свидетельствует о близкой к линейной связи между коллекторным и базовым токами транзистора в активном режиме.

Важным параметром передаточной характеристики является дифференциальный коэффициент усиления по току

$$\beta = \left. \frac{\partial i_к}{\partial i_б} \right|_{u_{кэ} = \text{const}}. \quad (2.2)$$

Величина β (определяющая наклон передаточной характеристики) обычно вычисляется по приближенной формуле

$$\beta = \frac{\Delta i_K}{\Delta i_B}. \quad (2.3)$$

Из соотношений (2.1)–(2.3) следует, что в активном режиме коллекторный, эмиттерный и базовый токи, а также их приращения связаны между собой следующим образом:

$$i_K = \beta i_B; \quad \Delta i_K = \beta \Delta i_B; \quad i_E = i_K + i_B = (\beta + 1)i_B; \quad \Delta i_E = (\beta + 1)\Delta i_B.$$

2.3. Полевые транзисторы. Общий принцип действия

Полевой транзистор — полупроводниковый прибор с тремя электродами — исток (*source*), сток (*drain*), затвор (*gate*). Между истоком и стоком располагается канал, выполненный из полупроводника *n*- или *p*-типа. Его проводимость зависит от электрического поля (перпендикулярного направлению тока в канале), создаваемого напряжением между электродами затвора и истока $u_{ЗИ}$.

Важной особенностью полевого транзистора является то, что управление током в канале происходит почти без затрат мощности, так как ток между затвором и каналом практически отсутствует.

В зависимости от способа изоляции затвора от канала полевые транзисторы делят на два класса: 1) с *p-n*-затвором (с управляющим *p-n*-переходом); 2) с изолированным затвором, так называемые **МОП-транзисторы**.

2.4. Полевые транзисторы с управляющим *p-n*-переходом и их вольт-амперные характеристики

В транзисторах этого вида затвор отделен от канала слоем полупроводника противоположного (по отношению к каналу) типа (рис. 2.4, *a*). В случае *n*-канала под затвором располагается полупроводник *p*-типа, а в случае *p*-канала — полупроводник *n*-типа. На границе этих областей образуется *p-n*-переход (см. рис. 2.4, *a*).

Обязательным условием нормальной работы прибора является запертое состояние данного перехода. С этой целью между затвором и истоком создается напряжение запирающей полярности. В соответствии с принятыми

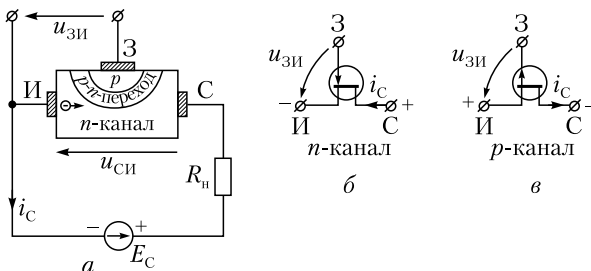


Рис. 2.4. Полевой транзистор с управляющим *p-n*-переходом:

a — структура *n*-канального транзистора; *б* — условное изображение *n*-канального транзистора; *в* — условное изображение *p*-канального транзистора