

**ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ**

---

**Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и  
транзисторных схем**

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТРАНЗИСТОРОВ И ТРАНЗИСТОРНЫХ  
СХЕМ**

*ИЗДАНИЕ ЧЕТВЕРТОЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ*

МОСКВА «ЭНЕРГИЯ» 1977

6Ф0.3 С79

УДК 621.382.3

Степаненко И. П.

С79 Основы теории транзисторов и транзисторных схем. Изд. 4-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1977.

672 с. с ил.

В книге проводятся анализ и расчет основных типов транзисторных усилителей, импульсных схем и источников питания. Анализу схем предшествует рассмотрение физических процессов в полупроводниковых диодах и транзисторах и характеристик диодов и транзисторов в качестве схемных элементов. Существенно переработана по сравнению с третьим изданием, вышедшим в 1973 г., первая часть книги, во вторую и третью части введены новые главы.

Книга предназначена для инженеров, аспирантов и студентов вузов, специализирующихся по микроэлектронике и прикладной электронике, вычислительной технике, автоматике и приборостроению.

**Содержание книги Основы теории транзисторов и транзисторных схем**

Предисловие к четвертому изданию

**ТРАНЗИСТОРЫ**

Глава первая. Полупроводники

1-1. Введение

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

---

- 1-2. Структура полупроводников и типы проводимости
- 1-3. Энергетические зоны твердого тела
- 1-4. Зонная структура полупроводников
- 1-5. Законы распределения носителей в зонах полупроводника
- 1-6. Уровень Ферми
- 1-7. Концентрация носителей
- 1-8. Подвижность носителей
- 1-9. Удельная проводимость и удельное сопротивление
- 1-10. Рекомбинация носителей
- Общие сведения (44). Равновесное состояние (47). Неравновесное состояние (50). Рекомбинация на ловушках (51). Время жизни (54). Поверхностная рекомбинация (57).
- 1-11. Законы движения носителей заряда в полупроводниках
- 1-12. Объемные заряды и поля в полупроводниках
- Диэлектрическая релаксация (63). Эффект поля (66). Неоднородные полупроводники (71). Квазинейтральность (74).
- 1-13. Кинетика носителей заряда в полупроводниках
- Биполярная диффузия (75). Дрейф (78). Монополярная диффузия (79). Комбинированное движение (85).

## Глава вторая. Полупроводниковые диоды

- 2-1. Введение
- 2-2. Электронно-дырочный переход
- Классификация р-п переходов (88). Структура р-п перехода (90). Анализ перехода в равновесном состоянии (93). Анализ перехода в неравновесном состоянии (97). Плавные р-п переходы (102). Односторонние р-п переходы (104).
- 2-3. Специальные типы переходов
- Переходы между примесными и собственными полупроводниками (105). Переходы между однотипными полупроводниками (106).
- 2-4. Контакты металл-полупроводник
- Выпрямляющие контакты (108). Невыпрямляющие (омические) . контакты (110).
- 2-5. Анализ идеализированного диода
- Исходные предпосылки (113). Решение диффузионного уравнения (115). Вольтамперная характеристика (117). Характеристические сопротивления (119). Температура перехода (121).
- 2-6. Обратная характеристика реального диода
- Тепловой ток (123). Ток термогенерации (124). Поверхностные каналы (126). Ток утечки (128). Эквивалентная схема диода при обратном смещении (128).
- 2-7. Пробой перехода
- Туннельный пробой (129). Лавинный пробой (131). Тепловой пробой (133).
- 2-8. Прямая характеристика реального диода
- Ток рекомбинации (134). Сопротивление базы (135). Зависимость прямого напряжения от температуры (137). Работа диода при высоком уровне инжекции (138). Дрейфовая составляющая тока инжектированных носителей (140). Коэффициент инжекции (141). Модуляция сопротивления базы (141). Распределение токов в базе (144). Эквивалентная схема диода при прямом смещении (146).
- 2-9. Переходные характеристики диода
- Барьерная емкость (емкость перехода) (147). Диффузионная емкость (148). Режим переключения (150). Установление прямого напряжения (151). Рассасывание избыточных

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

---

носителей (154). Восстановление обратного тока (сопротивления) (157).

## Глава третья. **Разновидности полупроводниковых диодов**

- 3-1. Точечные диоды
- 3-2. Полупроводниковые стабилитроны
- 3-3. Туннельные диоды
- 3-4. Диоды Шоттки

## Глава четвертая. **Транзисторы**

- 4-1. Введение
- 4-2. Основные процессы в транзисторе  
Инжекция и собирание неосновных носителей (176). Распределение носителей в базе (179). Модуляция толщины базы (180).
- 4-3. Статические характеристики транзистора  
Формулы Молла — Эберса (181). Идеализированные статические характеристики (183). Реальные статические характеристики (184)
- 4-4. Статические параметры транзистора  
Коэффициент передачи эмиттерного тока (188). Сопротивление эмиттерного перехода (192). Сопротивление коллекторного перехода (192). Коэффициент обратной связи по напряжению (193). Объемное сопротивление базы (194). Тепловой ток коллектора (195)
- 4-5. Динамические параметры транзистора  
Барьерные емкости (196). Коэффициент инжекции (196). Коэффициент переноса (197). Коэффициент передачи тока (200). Диффузионные емкости (204). Постоянная времени базы (205). Инверсные параметры (206).
- 4-6. Зависимость параметров от режима и температуры  
Зависимость от режима (207). Зависимость от температуры (210)
- 4-7. Характеристики и параметры транзистора при включении с общим эмиттером  
Статические характеристики и параметры (212). Динамические параметры (216). Схема с общим коллектором (221)
- 4-8. Разновидности эквивалентных схем  
П-образные эквивалентные схемы (221). Параметры транзистора как четырехполюсника (223). Сравнительная оценка (225)
- 4-9. Собственные шумы транзистора  
Источники шумов (226). Коэффициент шума (228). Анализ коэффициента шума (230). Мощность и напряжение шума (232)
- 4-10. Составные транзисторы
- 4-11. Допустимая мощность и особенности мощных транзисторов
- 4-12. Дрейфовые транзисторы  
Особенности дрейфовых транзисторов (238). Распределение носителей в базе (242). Коэффициент переноса (248). Динамические параметры (249).
- 4-13. Элементы технологии транзисторов  
Получение и очистка полупроводников (252). Механическая, и химическая обработка (254). Эпитаксия (255). Диффузия (257). Основные технологические циклы (261). Сплавная технология (262). Мезатехнология (262). Планарная технология (265). Фото-, литография (266)

## Глава пятая. **Разновидности транзисторов**

- 5-1. Точечный транзистор

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

---

5-2. Лавинный транзистор

5-3. Тиристоры

Динистор (275). Тринистор (280)

5-4. Униполярные (полевые) транзисторы

Унитрон (283). Разновидности унитронов (288). Особенности реальных приборов (290).

Эквивалентная схема (292)

5-5. Полевые транзисторы с изолированным затвором

Структура и классификация (293). Физические процессы (294). Общий анализ (300).

Характеристики и параметры в 1-м приближении (304). Характеристики и параметры во 2-м приближении (308). Влияние потенциала подложки (310). Эквивалентная схема (312).

Схемы включения (315)

## УСИЛИТЕЛИ

Глава шестая. **Статический режим усилительного каскада**

6-1. Выбор рабочей точки

6-2. Стабильность рабочей точки

Общий анализ (320). Стабильность типовых схем (323)

6-3. Расчет каскадов по постоянному току

Каскад с общей базой (325). Каскад с общим эмиттером (326). Каскад с общим коллектором (327)

Глава седьмая. **Усилители с емкостной связью**

7-1. Введение

7-2. Каскад в области средних частот

Упрощенный анализ (329). Внутренняя обратная связь (332). Полный анализ (334)

7-3. Каскад в области больших времен и низших частот

Влияние переходных емкостей (337). Влияние блокирующей емкости в цепи эмитера (338).

Совместное влияние емкостей (340). Коррекция искажений вершины (341)

7-4. Каскад в области малых времен и высших частот

Переходные характеристики (342). Частотные, характеристики (346). Добротность каскада (347). Коррекция фронта (350)

7-5. Многокаскадные усилители

Область средних частот (352). Область малых времен (353)

Глава восьмая. **Обратная связь в усилителя**

8-1. Введение

8-2. Общие вопросы однонаправленной обратной связи

Основные соотношения (356). Классификация (361).

8-3. Внутренняя обратная связь

Источник сигнала — генератор тока (365). Источник сигнала — генератор э. д. с. (366).

Сравнительная оценка (368)

8-4. Обратная связь по переменному току

Местная обратная связь по току (369). Местная обратная связь по напряжению (371).

Общая обратная связь (374)

8-5. Обратная связь по постоянному току

Глава девятая. **Эмиттерные повторители**

9-1. Введение

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

---

9-2. Простой повторитель

Входное сопротивление (382). Выходное сопротивление (385) Коэффициент передачи (386).  
Динамический диапазон (390)

9-3. Сложные повторители

Повторитель на составном транзисторе (392). Составной повторитель с внутренней обратной связью (393). Повторитель с динамической нагрузкой (394)

Глава десятая. **Каскад с эмиттерным входом**

10-1. Область средних частот

10-2. Передача фронта импульса

10-3. Каскад с эмиттерной связью

10-4. Каскад

Глава одиннадцатая. **Усилители с трансформаторной связью**

11-1. Введение

11-2. Коэффициент трансформации

11-3. Область средних частот

Параметры каскада (406). Максимальный коэффициент усиления мощности (407)

11-4. Область низших частот

Граничная частота и выбор индуктивности обмоток трансформатора (409). Искажения вершины импульса (410)

11-5. Максимальная частота генерации транзистора

Глава двенадцатая. **Мощные выходные каскады**

12-1. Введение

12-2. Однотактные каскады класса А

Энергетические соотношения (413). Нелинейные искажения (417). Особенности каскада ОЭ (418)

12-3. Двухтактные каскады класса В

Энергетические соотношения (420). Нелинейные искажения (424). Каскад с дополнительной симметрией (426)

Глава тринадцатая. **Усилители постоянного тока** 13-1. Введение

13-2. Температурный дрейф

13-3. Однотактные усилители

13-4. Термокомпенсация усилителей

13-5. Усилители с модуляцией сигнала

Глава четырнадцатая. **Дифференциальный каскад**

14-1. Введение

14-2. Общие свойства

14-3. Усилительные параметры

14-4. Точностные параметры

14-5. Эволюция схемы и параметров

14-6. Операционные усилители

14-7. Каскад на МДП транзисторах

**ИМПУЛЬСНЫЕ СХЕМЫ**

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

---

## Глава пятнадцатая. **Транзисторные ключи**

15-1. Введение

15-2. Статические характеристики ключа ОЭ

Режим отсечки (461). Режим насыщения (463)

15-3. Транзисторные прерыватели

15-4. Метод заряда

15-5. Переходные характеристики ключа ОЭ

Задержка фронта (478). Положительный фронт (479). Накопление носителей (480).

Рассасывание носителей. (483). Отрицательный фронт (488). Ключ с форсирующей емкостью (493)

15-6. Разновидности насыщенных ключей

15-7. Ненасыщенные ключи

Ключи с нелинейной обратной связью (498). Токовые ключи (501)

15-8. Мощность, рассеиваемая транзистором в ключевом режиме

## Глава шестнадцатая. **Симметричный триггер**

16-1. Введение

16-2. Статический режим

Условие запираания транзистора (509). Условие насыщения транзистора (510). Выходное напряжение и выходной ток (511). Статическая нагрузка (513)

16-3. Схемные варианты симметричного триггера

Триггер с автоматическим смещением (514). Триггер без смещения (515). Триггер с непосредственными связями (516).

16-4. Переходные процессы в режиме отдельных входов

Общее описание (517). Анализ фронтов (520). Максимальная рабочая частота (524)

16-5. Переходные процессы в режиме общего входа

Общее описание (526). Анализ фронтов (530). Максимальная рабочая частота (532).

Коллекторный запуск (533). Особенности применения дрейфовых транзисторов (535)

## Глава семнадцатая. **Триггер с эмиттерной связью**

17-1. Введение

17-2. Статический режим

Рабочий цикл (537). Входная характеристика (538). Анализ входной характеристики (540).

Статический расчет (512)

17-3. Стабильность порогов срабатывания и отпускания

Методика анализа (543). Анализ температурного дрейфа (544). Компенсация температурного дрейфа (548). Временной дрейф (549)

## Глава восемнадцатая. **Мультивибраторы**

18-1. Симметричные мультивибраторы

Рабочий цикл (549). Рабочая частота и ее стабильность (552). Регулирование частоты (555).

Скважность импульсов и отрицательный фронт (556)

18-2. Мультивибратор с разрядным триггером

Введение (559). Рабочий цикл (560). Рабочая частота и скважность (561)

## Глава девятнадцатая. **Одновибраторы**

19-1. Одновибратор с эмиттерной связью

Рабочий цикл (562). Статический расчет (563). Время выдержки и его стабильность (564).

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

---

Время восстановления (565). Роль спускового импульса (567)

19-2. Одновибратор с разрядным триггером

## Глава двадцатая. **Блокинг-генератор**

20-1. Общее описание

20-2. Интервал между импульсами

20-3. Фронты импульсов

20-4. Вершина импульса

20-5. Выброс напряжения

## Глава двадцать первая. **Генераторы пилообразного напряжения**

21-1. Введение

21-2. Общая характеристика и классификация

Параметры генераторов (588). Скелетная схема и режимы работы (589). Разновидности генераторов (590). Обратный ход (595). Особенности генераторов спадающего напряжения (596)

21-3. Простейшие генераторы с интегрирующей цепочкой

21-4. Генераторы с параметрическим стабилизатором тока

21-5. Генераторы со следящей связью

Генераторы с повторительной связью (602). Генераторы с усилительной связью (606).

Фантастроны (609)

## **ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ**

### Глава двадцать вторая. **Преобразователи постоянного напряжения**

22-1. Принцип действия и классификация

22-2. Анализ преобразователя с трансформаторной обратной связью

22-3. Особенности практической схемы

### Глава двадцать третья. **Стабилизаторы напряжения**

23-1. Введение

23-2. Стабилизаторы параллельного типа

Общие свойства (623). Диодные стабилизаторы (628). Транзисторные стабилизаторы (630)

23-3. Стабилизаторы последовательного типа

Общие свойства (632). Однокаскадный стабилизатор (635). Многокаскадные стабилизаторы (637)

23-4. Сравнение параллельных и последовательных стабилизаторов

23-5. Особенности практических схем

Регулировка выходного напряжения (642). Температурная стабильность (645). Зависимость параметров от частоты и режима (646)

23-6. Методика расчета стабилизаторов

Приложение

Список литературы

Предметный указатель

## **ПРЕДИСЛОВИЕ К ЧЕТВЕРТОМУ ИЗДАНИЮ**

# ЗАВОД НИЗКОВОЛЬТНОГО И ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

---

В предисловии к 3-му изданию отмечалось, что данная книга помимо по дискретной транзисторной технике рассчитана также на один из новых типов специалистов, появившихся благодаря развитию микроэлектроники, — проектировщиков интегральных схем. При подготовке 4-го издания автор старался внести такие изменения, которые отвечали бы интересам и тех и других. А именно, в первой части («Транзисторы») существенно переработаны и дополнены разделы, посвященные эффекту поля, контакту «металл-полупроводник», а также § 5-4 и § 5-5 (в этих двух параграфах, в частности, учтен ряд особенностей, свойственных интегральному исполнению). Во всей первой части автор старался в максимальной степени отдавать предпочтение кремниевым приборам по сравнению с германиевыми.

Во вторую часть («Усилители») введены гл. 14 «Дифференциальный каскад», а также § 10-4 «Каскад». Эти дополнения давно назрели, так как оба каскада давно вошли в практику и дискретных, и интегральных схем. Особо хотелось бы отметить, что в книге впервые анализируются усилители постоянного тока на МДП транзисторах (§ 14-7). Глава 13 сокращена в объеме, поскольку материал о параллельно-балансных каскадах помещен в гл. 14, и по существу посвящена однотактным усилителям постоянного тока.

В третьей части («Импульсные схемы») главное дополнение состоит в том, что в § 15-7 введен раздел «Токовые ключи», характеризующий ненасыщенный режим транзисторного ключа и одновременно дающий некоторое представление о логических схемах.

Как и в предыдущих изданиях, выполнен большой объем редакционной работы, включая сокращение текста в некоторых разделах и обновление литературы.

Автор отдает себе отчет в том, что структуру книги тоже желательно было бы усовершенствовать: материал, касающийся свойств полупроводников, превышает объемные нормы главы, материал о полевых транзисторах — нормы параграфов и т. п. Логические элементы, ячейки памяти, компараторы и некоторые другие типы схем в книгу не включены сознательно: при отборе материала автор по-прежнему руководствуется тем, что книга посвящена основам транзисторной техники и не является энциклопедическим обзором всех известных вариантов приборов и схем. Кроме того, учитывается, что многие схемы перспективны лишь в интегральном исполнении, а микроэлектронике должна быть посвящена специальная книга.

В книге в целях сохранения преемственности с предыдущими изданиями оставлены прежние буквенные обозначения параметров полупроводниковых приборов (таблица соответствия обозначений, принятых в книге и по ГОСТ, приведена в приложении).

Автор будет признателен читателям за предложения и замечания по улучшению содержания книги, которые следует направлять по адресу: 113114, Москва, Шлюзовая наб., 10, издательство «Энергия».

*Автор*

[Скачать книгу](#) Степаненко И. П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. Москва, Издательство «Энергия», 1977