
И. Е. ЕФИМОВ, И. Я. КОЗЫРЬ

ОСНОВЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ



И. Е. ЕФИМОВ, И. Я. КОЗЫРЬ

ОСНОВЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

УЧЕБНИК

Издание третье, стереотипное

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ · МОСКВА · КРАСНОДАР



ББК 32.844.1

Е 91

Ефимов И. Е., Козырь И. Я.

Е 91 Основы микроэлектроники: Учебник. 3-е изд., стер. — СПб.: Издательство «Лань», 2008. — 384 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

ISBN 978-5-8114-0866-5

В учебнике изложены основные направления развития микроэлектроники: рассмотрены физические основы, конструкция, технология, структурные элементы и аспекты проектирования интегральных микросхем (ИМС) и больших интегральных схем (БИС). Рассмотрены отдельные технологические процессы, схемотехнические решения, машинные методы проектирования и изготовления изделий микроэлектроники.

Учебник предназначен для студентов технических вузов и университетов, изучающих микроэлектронику.

ББК 32.844.1

Генеральный директор *А. Л. Кноп*. Директор издательства *О. В. Смирнова*
ЛР № 065466 от 21.10.97

Гигиенический сертификат 78.01.07.953.П.004173.04.07
от 26.04.2007 г., выдан ЦГСЭН в СПб

Издательство «ЛАНЬ». lan@lplib.spb.ru; www.lanbook.com
192029, Санкт-Петербург, Общественный пер., 5.
Тел./факс: (812)567-29-35, 567-05-97, 567-92-72

Книги издательства «Лань»
можно приобрести в оптовых книготорговых организациях:
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ. ООО «Лань-Трейд». 192029, Санкт-Петербург,
ул. Крупской, 13, тел./факс: (812)567-54-93, тел.: (812)567-85-78,
(812)567-14-45, 567-85-82, 567-85-91;
trade@lanpbl.spb.ru; www.lanpbl.spb.ru/price.htm

МОСКВА. ООО «Лань-пресс».
109263, Москва, 7-я ул. Текстильщиков, 6/19.
тел.: (495)1178-65-85; (495)740-43-16;
lanpress@ultimanet.ru; lanpress@yandex.ru

КРАСНОДАР. ООО «Лань-Юг». 350072, Краснодар, ул. Жлобы, 1/1,
тел.: (861)274-10-35; lankrd98@mail.ru

Сдано в набор 11.01.08. Подписано в печать 26.05.08.
Бумага офсетная. Гарнитура Школьная. Формат 84×108^{1/32}.
Печать офсетная. Усл. п. л. 20,16. Тираж 2000 экз.
Заказ № 2532

Отпечатано в полном соответствии
с качеством предоставленных диапозитивов
в ОАО «Издательско-полиграфическое предприятие «Правда Севера».
163002, г. Архангельск, пр. Новгородский, 32.
Тел./факс (8182) 64-14-54, тел.: (8182) 65-37-65, 65-38-78
www.ippps.ru, e-mail: zakaz@ippps.ru

Обложка
А. Ю. ЛАЛШИН

© Издательство «Лань», 2008
© И. Е. Ефимов,
И. Я. Козырь, наследники, 2008
© Издательство «Лань»,
художественное оформление, 2008

ПРЕДИСЛОВИЕ

Проектирование и создание изделий современной микроэлектроники — необходимое условие для создания в нашей стране передовой интеллектуальной техники и обеспечения технологической независимости и информационной безопасности отечественных электронных систем.

Изделия микроэлектроники — интегральные микросхемы различной степени интеграции, микросборки, микропроцессоры, мини- и микро-ЭВМ — позволили осуществить проектирование и промышленное производство функционально сложной радио- и вычислительной аппаратуры, отличающейся от аппаратуры предыдущих поколений лучшими параметрами, более высокими надежностью и сроком службы, меньшими потребляемой энергией и стоимостью. Аппаратура на базе изделий микроэлектроники находит широкое применение во всех сферах деятельности человека. Микроэлектроника способствует созданию систем автоматического проектирования, промышленных роботов, автоматизированных и автоматических производственных линий, средств связи и др.

Микроэлектроника является одним из наиболее быстро и эффективно развивающихся направлений науки и техники. Поэтому изучение ее основ необходимо при подготовке инженеров всех радиотехнических специальностей и специальностей электросвязи.

Главной задачей курса основ микроэлектроники для специальностей электросвязи является изучение физических принципов построения интегральных микросхем, способов их изготовления, основных конструктивных и электрических характеристик и методов оценки их качества и надежности. На основе этих знаний студенты могут успешно изучать радиотехническую аппаратуру и аппаратуру электросвязи, в которой широко применяются интегральные микросхемы.

Становление микроэлектроники как самостоятельной науки стало возможным благодаря использованию богатого опыта и базы промышленности, выпускающей дискретные полупроводниковые приборы. На современном этапе микроэлектроника продолжает продвигаться быстрыми темпами как в направлении совершенствования полупроводниковой интегральной технологии, так

и в направлении использования новых физических явлений. Впервые в учебной литературе основы микроэлектроники были изложены в книге И. П. Степаненко [2], в которой рассмотрены в органическом единстве физические, технологические и схемотехнические аспекты микроэлектроники.

Во втором издании данной книги по сравнению с первым существенной переработке подверглись все главы, особенно посвященные схемотехнике ИМС и БИС. Введены разделы по испытаниям ИМС и БИС в аппаратуре.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность рецензентам — зав. кафедрой «Конструирование радиоэлектронной аппаратуры и микроэлектроника» Ленинградского электротехнического института связи проф. Л.Ф. Григоровскому, доцентам этой кафедры Ю. Н. Балодису, О. В. Кустову, В. З. Лундину, А. Т. Мельниченко, Е. Д. Романову, Ю. Г. Тупикову за ценные замечания и предложения, учтенные при окончательной отработке рукописи. Авторы благодарят также инженера Р. А. Роздову за участие в переработке главы по гибридным микросхемам и канд. техн. наук В. И. Ефимова, написавшего параграф «Интегральные микросхемы СВЧ-диапазона».

Авторы с благодарностью приняли большинство замечаний по рукописи сотрудников кафедры микроэлектроники Московского ордена Трудового Красного Знамени электротехнического института связи.

Авторы

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Ефимов И. Е., Козырь И. Я. Основы микроэлектроники. — М.: Связь, 1975.
2. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники. — М.: Советское радио, 1980.

Дополнительная

1. Колесов Л. Н. Введение в инженерную микроэлектронику. — М.: Советское радио, 1974.
2. Алексеев А. Г. Основы микросхемотехники. — М.: Советское радио, 1977.
3. Ефимов И. Е., Горбунов Ю. И., Козырь И. Я. Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надежность. — М.: Высшая школа, 1977.
4. Ефимов И. Е., Горбунов Ю. И., Козырь И. Я. Микроэлектроника. Проектирование, виды микросхем, новые направления. — М.: Высшая школа, 1978.
5. Курносоев А. И., Юдин В. В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. — М.: Высшая школа, 1979.
6. Аваев Н. А., Дулин В. Н., Наумов Ю. Е. Большие интегральные схемы с инжекционным питанием. — М.: Советское радио, 1977.
7. Микропроцессорные БИС и микро-ЭВМ. Построение и применение / Под ред. А. А. Васенкова. — М.: Советское радио, 1980.
8. Аналоговые и цифровые интегральные схемы, Якубовский С. В. и др. / Под ред. С. В. Якубовского. — М.: Советское радио, 1979.
9. Преснухин Л. Н., Шахнов В. А., Кустов В. А. Основы конструирования микроэлектронных вычислительных машин. — М.: Высшая школа, 1976.
10. Пономарев М. Ф. Конструкции и расчет микросхем и микроэлементов ЭВА. — М.: Радио и связь, 1982.
11. Епифанов Г. И. Физические основы микроэлектроники. — М.: Советское радио, 1971.
12. Новиков В. В. Теоретические основы микроэлектроники. — М.: Высшая школа, 1972.
13. Пролетко В. М., Чекареев А. А. Качество, надежность и долговечность электронных приборов. — М.: Энергия, 1972.
14. Иванов-Есипович Н. К. Инженерные основы плечной микроэлектроники. — М.: Энергия, 1968.
15. Ермолаев Ю. П., Пономарев М. Ф., Крюков Ю. Г. Конструкции и технология микросхем / Под ред. Ю. П. Ермолаева. — М.: Советское радио, 1980.

16. Курносоев А. И., Брук В. А. Основы полупроводниковой микроэлектроники. — М.: Высшая школа, 1980.
17. Сергеев В. С., Воженнин И. Н. Интегральные гибридные микросхемы. — М.: Советское радио, 1973.
18. Фотолитография и оптика/Под ред. Я. А. Федотова и Г. Поля. — М.: Советское радио, 1974.
19. Наумов Ю. Е. Интегральные логические схемы. — М.: Советское радио, 1970.
20. Шагурин И. И. Транзисторно-транзисторные логические схемы/Под ред. Ю. Е. Наумова. — М.: Советское радио, 1974.
21. Ефимов И. Е., Кальман И. Г., Мартынов В. И. Надежность твердых интегральных схем. — М.: Изд-во стандартов, 1979.
22. Аронов В. А., Федотов Я. А. Испытания и исследования полупроводниковых приборов. — М.: Высшая школа, 1975.
23. Букреев И. Н. и др. Микроэлектронные схемы цифровых устройств. — М.: Советское радио, 1973.
24. Высокый Б. Ф. и др. Конструирование микроэлектронной аппаратуры. — М.: Советское радио, 1975.
25. Шило В. Л. Линейные интегральные схемы в радиоэлектронной аппаратуре/Под ред. Е. И. Гальперина. — М.: Советское радио, 1974.
26. Малорацкий Л. Г., Явич Л. Р. Проектирование и расчет СВЧ-элементов на полосковых линиях. — М.: Советское радио, 1972.
27. Свечников С. В. Элементы оптоэлектроники. — М.: Советское радио, 1967.
28. Стрижевский И. В. и др. Хемотроника. — М.: Наука, 1974.
29. Елисон М. И. Фундаментальные проблемы микроэлектроники и научно-технический прогресс. — М.: Микроэлектроника. Изд. АН СССР, 1972, т. 1, вып. 1.
30. Носов Ю. Р. Оптронные интегральные схемы. — М.: Электронная промышленность, 1973, № 2.
31. Вул Б. М. и др. Актуальные задачи полупроводниковой электроники. — М.: Вестник АН СССР, 1969, № 11.
32. Васенков А. А., Соколова Г. Н., Сретенский В. Н. Прогнозирование развития промышленной микроэлектроники. — М.: Электронная промышленность, 1977, № 6.
33. Васенков А. А., Сретенский В. Н., Федотов Я. А. Три проблемы электроники твердого тела. — В кн.: Микроэлектроника и полупроводниковые приборы. — М.: Советское радио, 1977, вып. 2.
34. Федотов Я. А. Полупроводниковая электроника, год 2001-й. — М.: Советское радио, Будапешт.: Изд-во техн. лит-ры, 1975.
35. Шокин А. И. Полупроводниковая электроника. БСЭ, т. 20, изд. 3-е.
36. Основы проектирования микроэлектронной аппаратуры/Под ред. Б. Ф. Высоккого. — М.: Советское радио, 1977.
37. Штернов А. А. Физические основы конструирования, технологии РЭА и микроэлектроники. — М.: Радио и связь, 1981.
38. Гитис Э. И., Пискулов Е. А. Аналого-цифровые преобразователи. — М.: Энергия, 1981.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
<i>Глава 1. Основные положения микроэлектроники и направления ее развития</i>	<i>12</i>
§ 1.1. Этапы миниатюризации и микроминиатюризации элементов электронной аппаратуры	12
§ 1.2. Общая характеристика микроэлектроники	18
§ 1.3. История развития микроэлектроники	23
§ 1.4. Изделия микроэлектроники и классификация интегральных микросхем.	27
§ 1.5. Система обозначений интегральных микросхем	32
<i>Глава 2. Физические принципы работы и создания интегральных микросхем</i>	<i>39</i>
§ 2.1. Явления, процессы и методы, используемые в интегральной микроэлектронике	39
§ 2.2. Общая характеристика явлений и процессов, определяющих функционирование ИМС	41
§ 2.3. Базовые физико-химические методы создания микроэлектронных структур	55
<i>Глава 3. Полупроводниковые интегральные микросхемы</i>	<i>80</i>
§ 3.1. Типовые конструкции и структура полупроводниковых ИМС	80
§ 3.2. Биполярные транзисторы	89
§ 3.3. МДП-транзисторы	103
§ 3.4. Диоды	112
§ 3.5. Полупроводниковые резисторы	116
§ 3.6. Полупроводниковые конденсаторы	122
§ 3.7. Технология изготовления биполярных ИМС	127
§ 3.8. Технология изготовления МДП-ИМС	138
§ 3.9. Сборка и герметизация полупроводниковых ИМС	145
§ 3.10. Этапы разработки и проектирования полупроводниковых ИМС	148
<i>Глава 4. Гибридные интегральные микросхемы</i>	<i>155</i>
§ 4.1. Конструкция гибридных ИМС	155
§ 4.2. Элементы толстопленочных гибридных ИМС	159
§ 4.3. Методы получения тонких пленок	164
§ 4.4. Подложки для гибридных ИМС	172
§ 4.5. Пленочные резисторы	175
§ 4.6. Пленочные конденсаторы	180
§ 4.7. Индуктивные элементы в пленочных ИМС	186
§ 4.8. Пленочные проводники и контактные площадки	188
§ 4.9. Межслойная изоляция	190
§ 4.10. Методы получения различных конфигураций пассивных элементов гибридных ИМС	191
§ 4.11. Навесные компоненты гибридных ИМС	195

§ 4.13.	Основные принципы разработки и этапы проектирования гибридных ИМС	203
§ 4.14.	Исходные данные для проектирования гибридных ИМС	206
§ 4.15.	Проектирование топологии и конструкции гибридных ИМС	210
<i>Глава 5.</i>	<i>Большие интегральные схемы</i>	<i>217</i>
§ 5.1.	Общая характеристика и основные параметры БИС	217
§ 5.2.	Классификация и области применения БИС	221
§ 5.3.	Элементная база БИС	226
§ 5.4.	Конструкция и технология изготовления полупроводниковых БИС	229
§ 5.5.	Конструкция и технология изготовления гибридных БИС	241
§ 5.6.	Особенности и основные этапы проектирования БИС	247
<i>Глава 6.</i>	<i>Основы микросхемотехники и интегральные микросхемы для аппаратуры связи</i>	<i>258</i>
§ 6.1.	Схемотехнические особенности ИМС	258
§ 6.2.	Основные типы цифровых ИМС на биполярных транзисторах	260
§ 6.3.	Схемотехническая реализация основных логических функций ИМС	266
§ 6.4.	Микромощные логические ИМС	271
§ 6.5.	Логические ИМС на МДП-транзисторах	275
§ 6.6.	Тенденции развития цифровых ИМС	281
§ 6.7.	Основные типы аналоговых (линейных) ИМС	284
§ 6.8.	Интегральные микросхемы для аппаратуры связи	292
§ 6.9.	Микропроцессоры	298
§ 6.10.	Интегральные микросхемы СВЧ-диапазона	302
<i>Глава 7.</i>	<i>Качество, надежность и применение интегральных микросхем</i>	<i>312</i>
§ 7.1.	Основные понятия теории качества	312
§ 7.2.	Основные понятия теории надежности	316
§ 7.3.	Методы контроля качества и оценки надежности ИМС	321
§ 7.4.	Категории и виды испытаний ИМС	326
§ 7.5.	Стоимость ИМС и БИС	330
§ 7.6.	Пути повышения качества и надежности ИМС	335
§ 7.7.	Основы применения ИМС и БИС	339
<i>Глава 8.</i>	<i>Функциональная микроэлектроника</i>	<i>345</i>
§ 8.1.	Основные направления развития функциональной микроэлектроники	345
§ 8.2.	Оптоэлектроника	351
§ 8.3.	Акустоэлектроника	361
§ 8.4.	Диэлектрическая электроника	366
§ 8.5.	Хемотроника	368
§ 8.6.	Биоэлектроника	372
§ 8.7.	Дальнейшее развитие микроэлектроники	375
<i>Литература</i>	<i>.</i>	<i>381</i>