

№ 2295

М.Н. Орлова
И.В. Борзых

Схемотехника

Курс лекций

№ 2295

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра полупроводниковой электроники и физики
полупроводников

М.Н. Орлова
И.В. Борзых

Схемотехника

Курс лекций

Рекомендовано редакционно-издательским
советом университета



Москва 2016

УДК 621.375.1
О-66

Рецензент
канд. физ.-мат. наук, доц. *О.И. Рабинович*

Орлова М.Н.

О-66 Схемотехника : курс лекций / М.Н. Орлова, И.В. Борзых. –
М. : Изд. Дом МИСиС, 2016. – 83 с.
ISBN 978-5-87623-981-5

Приведен обзор основных электронных схем и устройств схемотехники. Представлено описание функционирования, методов анализа и синтеза наиболее важных устройств (логических и аналоговых интегральных схем, устройств памяти и т.д.). Рассмотрено большое количество примеров конструкций и топологии (КМОП и БиКМОП) элементной базы современных интегральных микросхем.

Предназначен для бакалавров, обучающихся по направлению 11.03.04 «Электроника и нанoeлектроника».

УДК 621.375.1

ISBN 978-5-87623-981-5

© М.Н. Орлова,
И.В. Борзых, 2016
© НИТУ «МИСиС», 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Основные положения и направления развития схемотехники.....	5
1.1. Термины и определения.....	5
1.2. История и этапы развития микроэлектроники.....	6
1.3. Основы классификации изделий микроэлектроники.....	10
1.4. Фундаментальные пределы развития микроэлектроники	13
2. Технология изготовления элементов интегральных микросхем ...	15
2.1. Транзисторы <i>n-p-n</i> -типа	15
2.2. Соединения и контактные площадки.....	17
2.3. Изоляция элементов	19
2.4. Механическая обработка	20
2.5. Окисление.....	21
2.6. Фотолитография	22
2.7. Травление	23
2.8. Диффузия.....	24
2.9. Эпитаксия	25
2.10. Создание металлизации и разделение пластин на кристаллы	27
3. Пассивные элементы интегральных микросхем	28
3.1. Интегральные резисторы	28
3.2. Элементы интегральных схем	29
3.2.1. Биполярный транзистор	29
3.2.2. Диоды в интегральных схемах	33
3.2.3. Конденсаторы в интегральных схемах	34
4. Логические элементы интегральных схем	38
4.1. Классификация логических элементов.....	38
4.2. Основные характеристики логических элементов	42
4.3. Логические интегральные схемы на биполярных транзисторах.....	44
4.4. Логические элементы с передачей тока или напряжения.....	45
4.4.1. Транзисторная логика с непосредственными связями.....	45
4.4.2. Резисторно-транзисторная логика	46
4.4.3. Резисторно-емкостная транзисторная логика	47
4.4.4. Интегральная инжекционная логика	48
4.4.5. Логические элементы с логикой на входе. Диодно-транзисторная логика.....	48
4.4.6. Транзисторно-транзисторная логика	50
4.4.7. Транзисторно-транзисторная логика с диодами Шоттки ...	56

4.5. Логические схемы на переключателях тока.....	58
4.5.1. Эмиттерно-связанная логика	58
4.5.2. Схемы на транзисторах с каналами одного типа проводимости.....	60
4.5.3. Схемы на комплементарных транзисторах	62
4.5.4. Логические элементы на БиКМОП-транзисторах.....	64
5. Триггеры.....	66
5.1. Триггер. Бистабильная ячейка.....	66
5.2. Триггер Шмитта.....	67
5.3. RS-триггер.....	68
5.4. RST-триггер.....	69
5.5. D-триггер.....	70
5.6. T-триггер	71
5.7. JK-триггер	72
6. Операционные усилители.....	74
6.1. Классификация операционных усилителей	74
6.2. Цепи смещения интегральных усилителей	75
6.3. Операционные усилители на биполярных транзисторах.....	78
6.4. Операционные усилители на МОП-транзисторах	80
Библиографический список.....	82

1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ СХЕМОТЕХНИКИ

1.1. Термины и определения

Электроника – это наука о взаимодействии электронов с электромагнитными полями и о методах создания электронных приборов и устройств, используемых для передачи, обработки, хранения, воспроизведения и использовании информации; это область техники, в основе которой лежит использование электронных приборов.

Электроника бывает: вакуумная, квантовая, криогенная, молекулярная, полупроводниковая, промышленная, спиновая, твердотельная, физическая, функциональная (направление твердотельной электроники, охватывающее вопросы использования разнообразных физических явлений в твердых средах для интеграции различных схемотехнических функций в объеме одного твердого тела и создания электронных устройств с интеграцией) и т.д.

Микроэлектроника – это область электроники, связанная с созданием и применением приборов и устройств в микроминиатюрном исполнении, изготавливаемых с применением групповой (интегральной) технологии.

Схемотехника – это принципы и методы синтеза и реализации схем радиоэлектронных устройств, обеспечивающие их оптимальные характеристики на основе использования физических свойств и технических возможностей электронных приборов и электрорадиокомпонентов.

Микросхемотехника (интегральная схемотехника) – это раздел микроэлектроники, охватывающий вопросы расчета и проектирования микроэлектронных изделий и способов их сочетания.

Интегральная микросхема (микросхема) [IC – integrated circuit] – это микроэлектронное изделие, имеющее высокую степень упаковки электрически соединенных элементов и рассматриваемое как единое конструктивное целое, выполняющее определенную функцию преобразования, обработки сигнала и (или) накопления информации и имеющее высокую плотность упаковки электрически соединенных элементов (или элементов и компонентов).

Плотность упаковки – это отношение числа простых компонентов и элементов, в том числе содержащихся в составе сложных компонентов, к объему микросхемы без учета объема выводов.

С точки зрения внутреннего устройства микросхема представляет собой совокупность большого числа элементов и компонентов, размещенных на поверхности или в объеме общей диэлектрической или полупроводниковой подложки. Термин «интегральная» отражает конструктивное объединение элементов и компонентов, а также полное или частичное объединение технологических процессов их изготовления.

При использовании в радиоэлектронной аппаратуре сами микросхемы являются элементами, т.е. простейшими неделимыми единицами. В этом смысле они составляют элементную базу радиоэлектронной аппаратуры.

Особенностью микроэлектронных устройств является высочайшая степень сложности выполняемых ими функций. Очевидно, что при большом числе элементов обеспечить правильность связей между ними и надежность функционирования вручную невозможно. Отсюда следует ключевое требование максимальной автоматизации производства изделий микроэлектронной техники.

Принципиально важным моментом является то, что при изготовлении микросхем используется групповой метод производства. Суть его заключается в том, что на одной пластине полупроводникового материала одновременно изготавливается большое число интегральных схем. Кроме того, если позволяет технологический процесс, одновременно в работе находится несколько десятков таких пластин. По завершении основного технологического цикла пластина режется на кристаллы, каждый из которых представляет собой отдельную микросхему. На заключительной стадии осуществляют корпусирование – помещение кристалла в корпус и соединение контактных площадок с выводами (ножками) интегральной схемы.

Групповой метод производства и необходимость выполнения большого числа электрических соединений делают оптимальной и пока безальтернативной пленарную (от англ. plane – плоскость) технологию изготовления микросхем. При этом все элементы и их составляющие, а также необходимые соединения формируются в интегральной схеме через плоскость.

1.2. История и этапы развития микроэлектроники

История создания интегральных схем (ИС) началась во второй половине XX столетия. К тому времени сформировались необходимые для этого предпосылки – с одной стороны, радиоэлектронная

аппаратура становилась всё сложнее, а значит, и дороже в сборке, наладке и ремонте. Кроме того, с увеличением количества деталей и межсоединений резко снижалась надежность. С другой стороны, появились соответствующие технологии, в первую очередь связанные с твердотельной полупроводниковой электроникой.

Первые в мире ИС были разработаны и изготовлены в 1959 г. американцами Джеком Сент Клером Килби (фирма Texas Instruments) и Робертом Н. Нойсом (Fairchild Semiconductor) независимо друг от друга.

В мае 1958 г. Джек Килби перешёл в фирму Texas Instruments (TI) из фирмы Centralab, в ней он возглавлял программу по разработке слуховых аппаратов, для которых фирма открыла небольшое предприятие по созданию германиевых транзисторов. Уже в июле 1958 г. Килби пришла в голову идея создания ИС. Из полупроводниковых материалов уже умели изготавливать резисторы, конденсаторы и транзисторы. Резисторы изготавливали, используя омические свойства полупроводника, а для создания конденсаторов использовались смещённые в обратном направлении *p-n*-переходы.

В начале октября 1958 г. Килби начал создавать конструкцию триггера на одном кусочке монокристаллического германия. Для его изготовления был применён метод фотогравировки, которым владела фирма TI. В начале 1959 г. такая «твёрдая схема» была изготовлена, а в марте 1960 г. представлена на выставке американского Института радиоинженеров. Килби подал заявку на выдачу патента. Марк Шеферд, тогда вице-президент фирмы TI, отметил данную работу Килби «как наиболее значительную разработку фирмы Texas Instruments со времени выпуска кремниевого транзистора».

Однако несмотря на широкое освещение прессой, это достижение было встречено весьма скептически, хотя большинство критических замечаний были верными: ограничения, связанные с интеграцией (параметры индивидуальных компонентов ИС нельзя оптимизировать); выход годных ИС был менее 10 %; дороговизна готовой матрицы-образца ИС; невозможность в последующем видоизменять и дорабатывать схему.

Многие недостатки твёрдых схем были устранены позднее Робертом Нойсом. С января 1959 г., занимаясь в фирме Fairchild Semiconductor (FS) исследованием возможностей планарного транзистора, он вплотную занялся выдвинутой им идеей создания интегральных диффузионных или напылённых резисторов методом изоляции приборов с помощью смещённых в обратном направлении *p-n*-переходов и соединения элементов через отверстия в оксиде путём напыления ме-