# Курс “САПР в микроэлектронике”.
# ВВЕДЕНИЕ (1-2)

Системы Автоматического ПРоектирования (САПР) в микроэлектронике – средства проектирования интегральных схем (ИС) разной сложности, от простейших функциональных элементов до так называемых систем на кристалле, и на разных уровнях их представления – структурном, алгоритмическом, схемотехническом, топологическом. Некоторые из САПР позволяют также проектировать печатные платы, на которых размещаются ИС в корпусах и внешние (навесные) элементы, а также соединительные разъемы.

Терминология (здесь и далее в выделенных фрагментах)

Система Автоматического ПРоектирования (САПР) – Computer Added Design (CAD)
Интегральная схема (ИС) – Integrated Circuit (IC)
Система на кристалле (СнК) - System-on-Chip (SOC)
Корпус ИС – package
Печатная плата (ПП) – printed circuit board (PCB)

Предшествующие курсы:

- Физика полупроводников (все ИС изготавливаются на п/п пластинах и свойства п/п влияют на свойства интегральных компонентов)
- Физика электронных приборов (особенности приборов в интегральном исполнении влияют на их модели)
- Аналоговые, цифровые и смешанные устройства (представления о способах построения таких устройств)

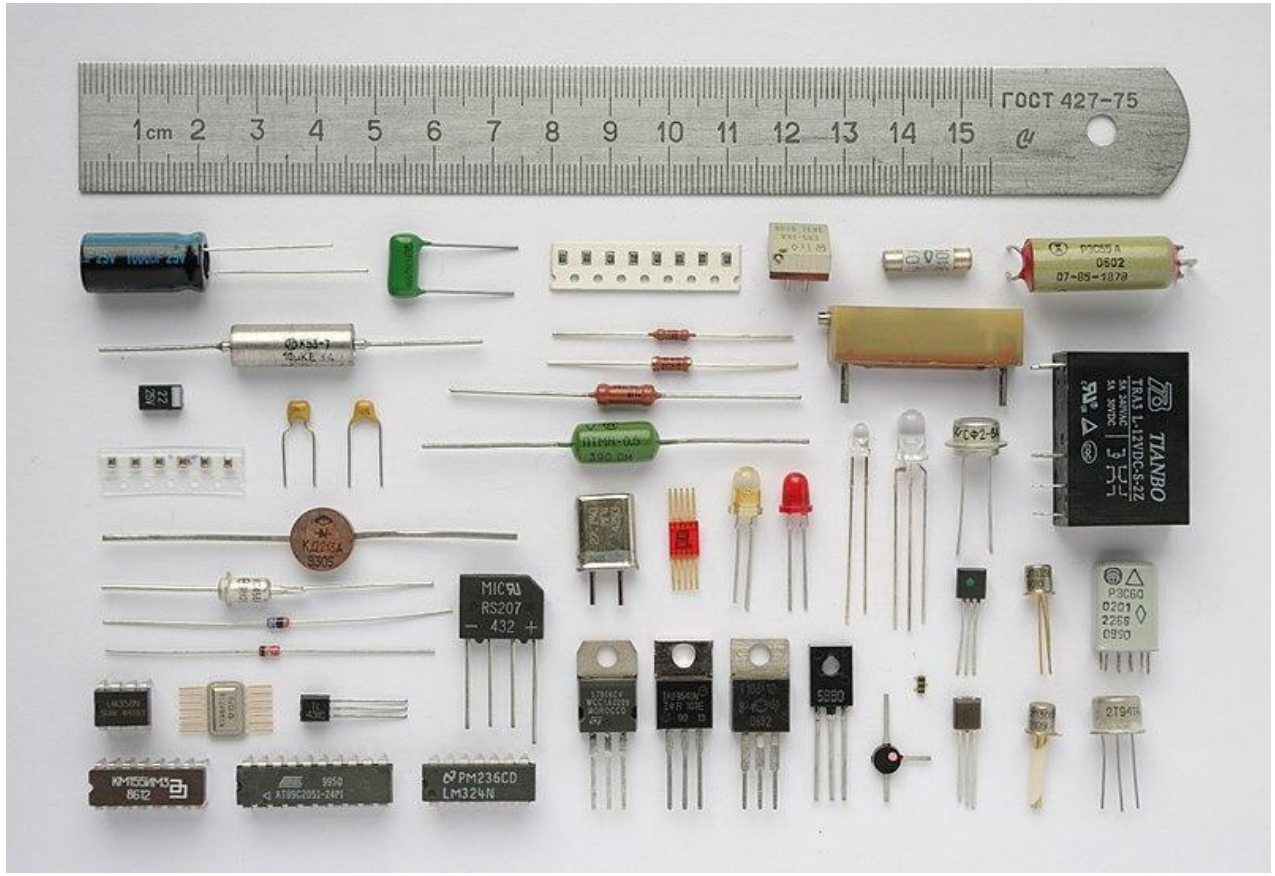
# ВВЕДЕНИЕ (2-2)

## Содержание курса (темы и вопросы к экзамену)

1) Элементная компонентная база (ЭКБ) микроэлектроники: пассивные и активные элементы интегральных схем (ИС), примеры их применения.
2) Разновидности ИС по функциям, степени интеграции, типу используемых активных элементов и способам проектирования.
3) Особенности моделей пассивных элементов для машинных расчетов.
4) Особенности моделей транзисторов для машинных расчетов.
5) Основные параметры моделей биполярных транзисторов (БТ) для машинных расчетов.
6) Основные параметры моделей полевых транзисторов (ПТ) для машинных расчетов.
7) Последовательность проектирования ИС с использованием САПР.
8) Алгоритмы анализа схем во временной области (tran): методы численного интегрирования при решении дифференциальных уравнений.
9) Алгоритмы анализа схем в частотной области (ac sweep): преимущества и ограничения.
10) Расчет схем по постоянному току (dc sweep): примеры применения.
11) Статистический анализ в САПР и метод Монте-Карло.
12) Расчет на наихудший случай и PVT-анализ.
13) Постановка задачи оптимизации и ее реализация как опции САПР.
14) Разновидности САПР: критерии различий.
15) Разновидности САПР: типовой состав функций современных САПР.
16) Популярные САПР сквозного проектирования и САПР с ограниченной функциональностью (“учебные”).
17) Методы и средства проектирования систем на кристалле: определения и уровни представления проекта.
18) Методы и средства проектирования систем на кристалле: средства моделирования на разных уровнях (HDL, VHDL, RTL,…).
19) Макромодели элементов и узлов: назначение и разновидности.
20) Автоматизация расчетов: способ представления анализируемых схем в САПР, пригодный для автоматизации расчетов.
21) Автоматизация расчетов: скрипты в САПР Cadence.

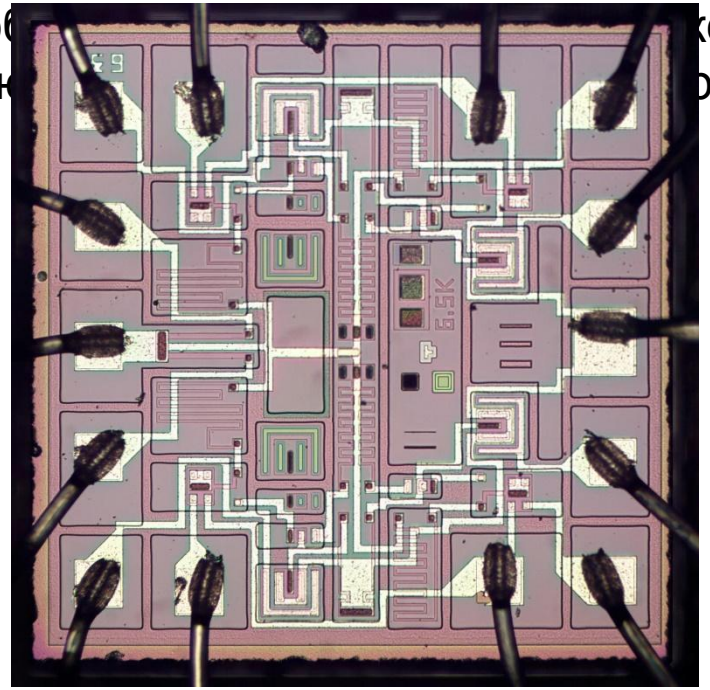
По смыслу данный курс предполагает, наряду с представлениями о САПР в микроэлектронике, практический выход – умение применять САПР для решения расчетных задач. Поэтому на практических занятиях (ПР в расписании) мы будем рассматривать примеры таких решений, а для получения практических навыков <u>убедительно рекомендуется выполнение домашних заданий в среде САПР OrCAD</u>, которую можно установить на домашнем компьютере.

Компоненты ИС делятся на пассивные и активные, способные усиливать входные сигналы по мощности.
https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D0%BA%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%BE%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%8B
Общее свойства компонентов (или приборов) в традиционных ИС: 1. они не преобразуют вид энергии, входные и выходные сигналы – электрические токи и напряжения; 2. не являются полностью независимыми из-за влияния связей в общем кристалле.

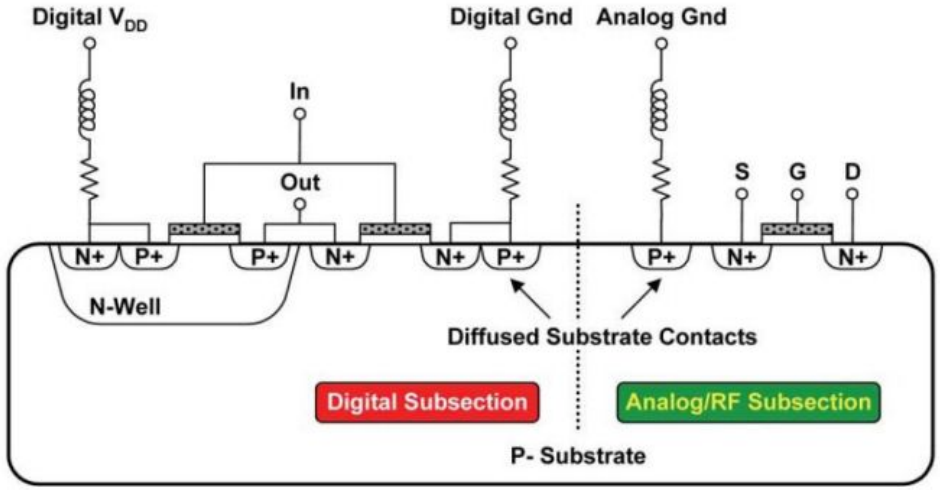


Программируемая логическая ИС (ПЛИС, FPGA). Миним. размеры компонентов на кристалле могут быть меньше 10 нм (1 нм = $10^{-9}$ м ). Степень интеграции (число транзисторов на кристалле) может быть больше $10^{7}$-$10^{9}$.

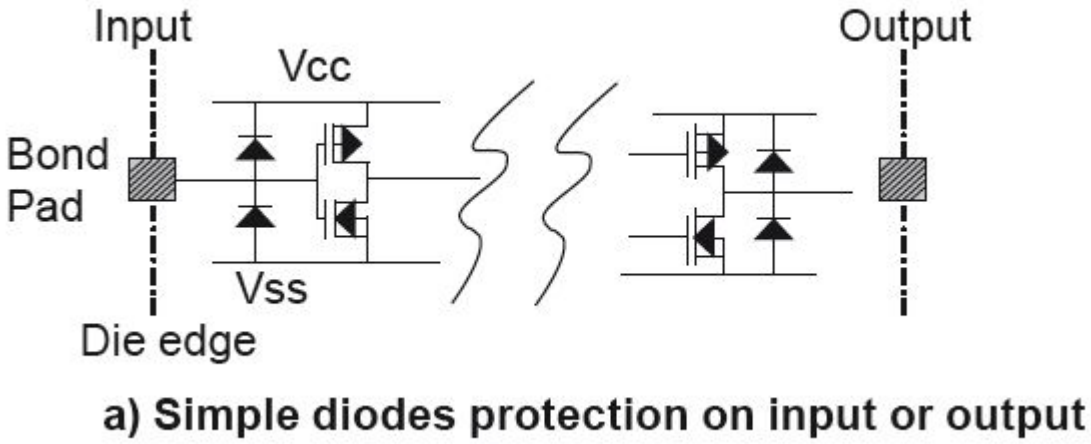
Особенности интегральных компонентов:
А. Планарное расположение выводов
Б. Соединения в схемах слоями металла или поликремния
В. Сильное взаимное влияние, особенно на высоких частотах
и необходимость изоляции (типовое решение-изоляция с помощью обратно-смещенных pn-переходов, диодов)
Г. Необ компонентов, подклю ристалла



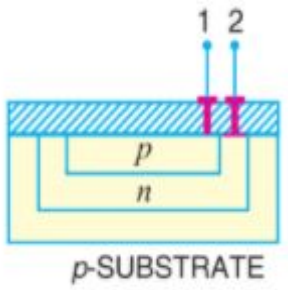
ИС без корпуса (А, Б)



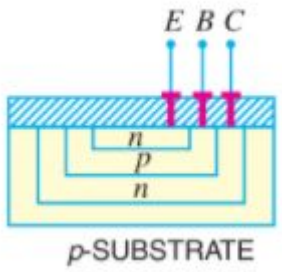

Фрагмент кристалла ИС в разрезе

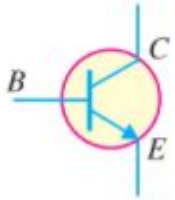



(Г
)

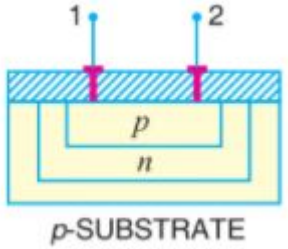


Диод (при $U_{12}$ разных знаков)

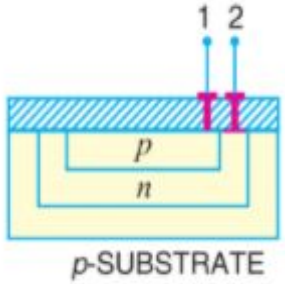


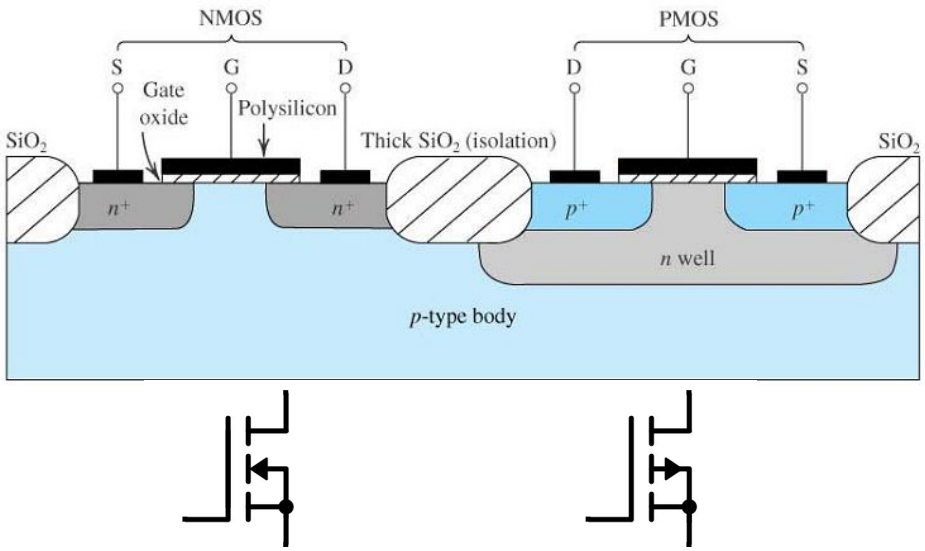

Биполярный npn транзистор (БТ, BT)



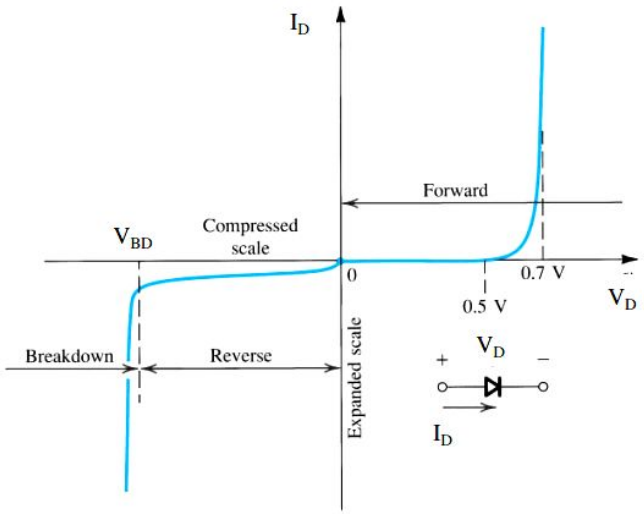
Резистор



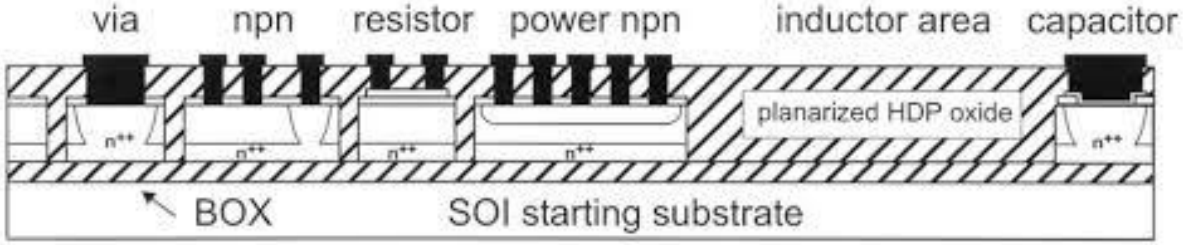
Конденсатор (при $U_{12} = U_1 - U_2 < 0$ – диод закрыт)




Транзисторы со структурой металл-окисел-полупроводник (МОП,MOS) с n- и p-каналом




Вольт-амперная характеристика pn-перехода (диода): запертый диод – не разрыв!




Третий способ изоляции компонентов на кристалле: технология кремний на изоляторе (КНИ, SOI)

Другие критерии классификации ЭКБ:
- Быстродействие (полоса рабочих частот)
- Мощность/напряжение питания
- Приведенный ко входу уровень шума

Примеры применения ЭКБ:

а) Аналоговые устройства:

ОУ

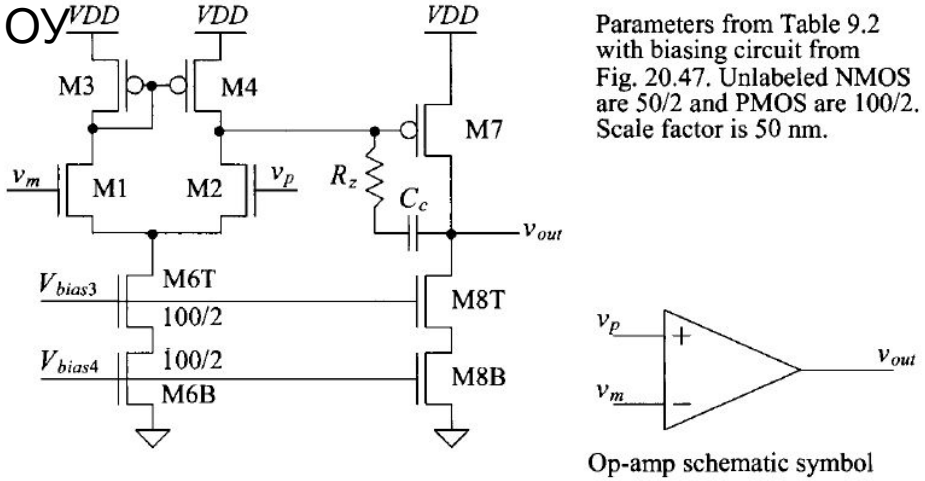
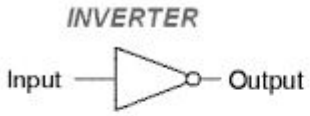


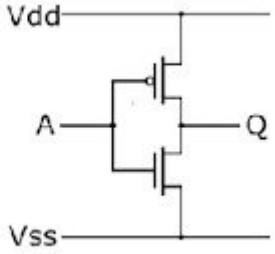

**Figure 24.2** Basic two-stage op-amp.

Другие устройства: компараторы, фильтры, логарифмические усилители, устройства выборки/ хранения,…

Б) Цифровые устройства: инвертор

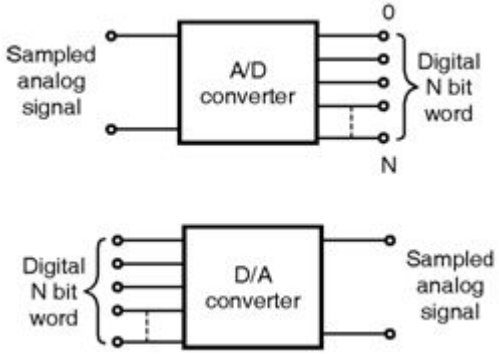



| Input | Output |
|---|---|
| 1 | 0 |
| 0 | 1 |




Другие устройства: логические элементы, триггеры, п/п память, процессоры,…

В) Смешанные устройства: АЦП/ЦАП




Задачи, решаемые проектировщиками с использованием САПР:
- Построение, отладка и оптимизация схемы
- Разработка топологии
- Пересчет схемы с учетом паразитных параметров топологии
- Разработка печатной платы

Методы и средства решения:
- Регулирование размеров и режимов работы транзисторов в схеме
- Анализ и оптимизация/устранение критичных по быстродействию трактов
- Многопараметрические и автоматизированные расчеты
- Анализ влияния температуры, напряжения питания и технологических разбросов

# ТЕМА 1. Элементная компонентная база (ЭКБ) микроэлектроники (5-5)

ВОПРОСЫ:

1. Какие из зарубежных фирм являются лидерами в субмикронных технологиях изготовления ИС?
https://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor_device_fabrication

2. Что ограничивает дальнейшее масштабирование технологий (снижение размеров компонентов на кристалле)?
https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%BC%D0%B0%D1%81%D1%88%D1%82%D0%B0%D0%B1%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F_%D0%94%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%80%D0%B4%D0%B0

3. Дайте корректный перевод техническим терминам, используемым на слайдах: well, bond pad, substrate, breakdown, oxide.

4. Какие эквивалентные схемы используются для учета паразитных параметров корпусов ИС?
http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.116.8655&rep=rep1&type=pdf
Electrical Analysis of IC Packaging with Emphasis on Different Ball Grid Array Packages

5. Что означают сокращения: русские - СБИС, СнК, КНИ/КНС, английские - BT, CMOS, SOI, ADC/DAC ?

6. По каким причинам вместо встроенных (интегральных) компонентов могут использоваться внешние (навесные, дискретные) элементы (резисторы, конденсаторы, индуктивности, диоды, транзисторы) ?

# ТЕМА 2. Разновидности ИС по функциям, степени интеграции, типу используемых активных элементов и способам проектирования

| Тип ИС | Разновидности ИС по функциям (примеры) | Степень интеграции |
|---|---|---|
| Относительно простые ИС малой степени интеграции (МИС) | “Однородные” аналоговые, цифровые или смешанные ИС | до 100 элементов в кристалле |
| ИС средней степени интеграции (СИС) | Многоканальные тракты обработки сигналов | до 1000 элементов |
| БИС и СБИС | Системы на кристалле | до 10 тыс. элементов и более |

Состав активных элементов/технология изготовления ИС:

- МОП транзисторы/КМОП (CMOS) технология
- Биполярные транзисторы/биполярная технология
- Биполярные и МОП транзисторы/смешанная БиКМОП (BiCMOS) технология

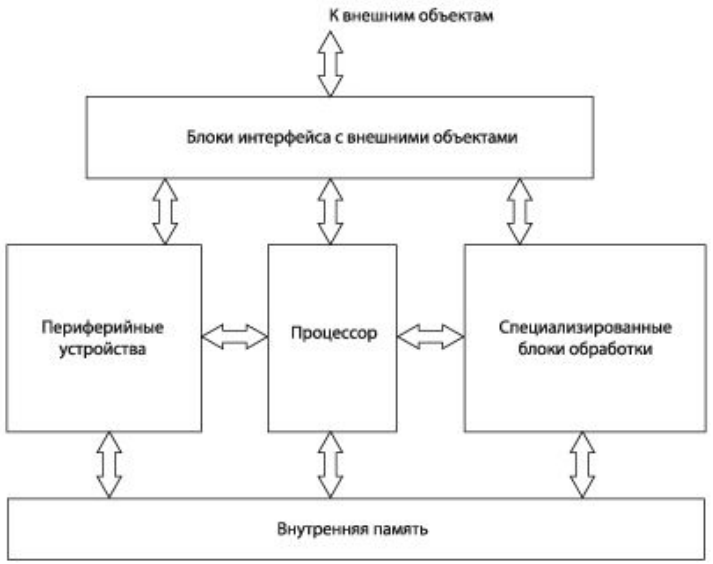
Большая часть транзисторов на кристалле (до 90% и более) – МОП. Большая часть используемых технологий – объемные КМОП технологии, которые позволяют строить системы на кристалле.

Способы проектирования, поддерживаемые САПР, должны быть адаптированы для разных по функциональному назначению блоков, а для сложных и составных ИС их реализация должна отличаться высокой вычислительной эффективностью при сохранении высокой точности (достоверности) результатов расчетов. Эффективность зависит от используемых в САПР алгоритмов, поддержки автоматизированных и параллельных вычислений. Точность зависит от поддержки моделей субмикронных транзисторов и заданных пользователем параметров алгоритмов (чем больше точность, тем больше время расчетов).

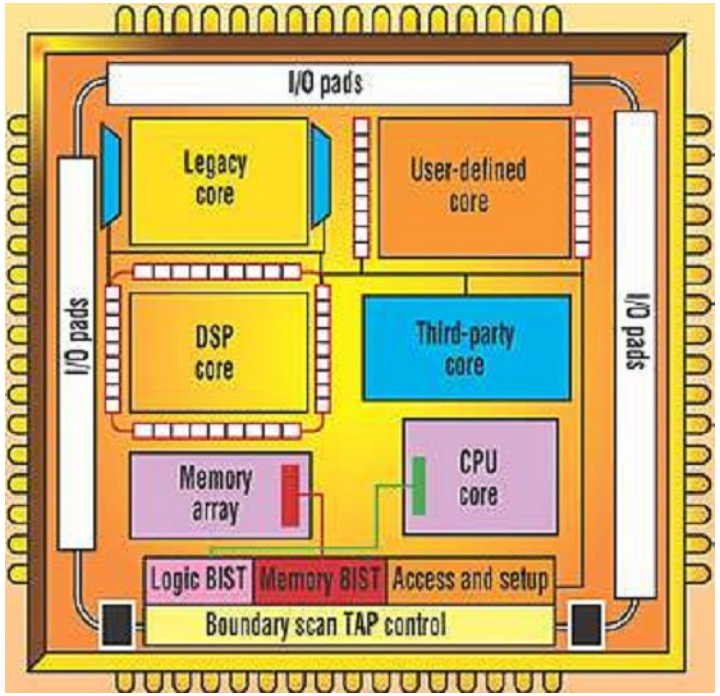
# ТЕМА 2. Разновидности ИС по функциям, степени интеграции, типу используемых активных элементов и способам проектирования

## ИС типа система-на-кристалле

https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0_%D0%BD%D0%B0_%D0%BA%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BB%D0%B5




Пример логической организации



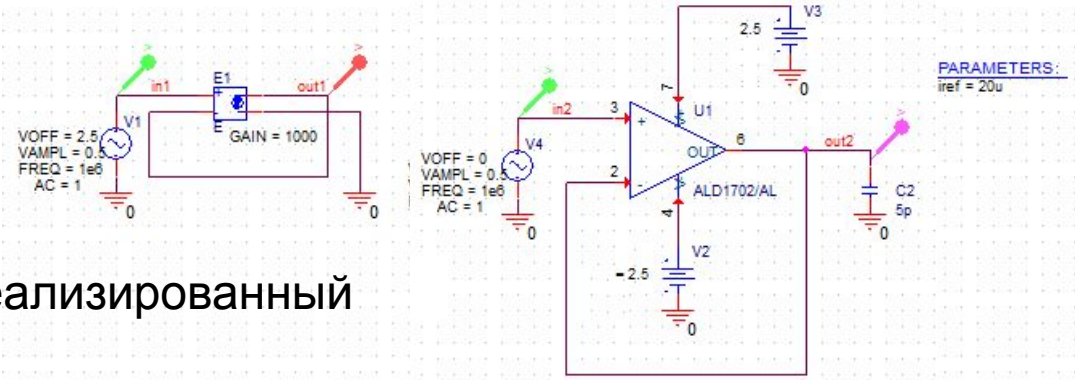

Пример физической организации

Аналоговые устройства обрабатывают аналоговые сигналы, обычно не дискретизированные по амплитуде и времени. Описываются множеством параметров (показателей качества) и часто требуют заказного проектирования для получения наилучших результатов.

Цифровые устройства обрабатывают цифровые сигналы, дискретизированные по амплитуде и времени. Описываются ограниченным числом показателей (задержки, фронты и срезы) и могут быть спроектированы полностью в автоматическом режиме (от выполняемой функции до принципиальной схемы и топологии).

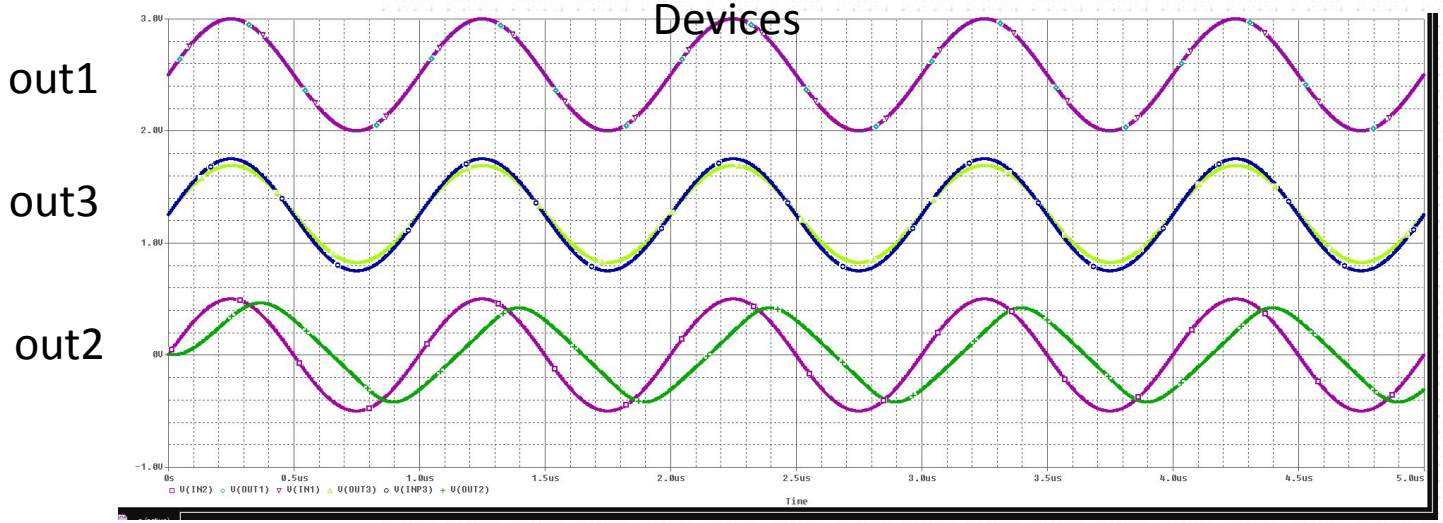
Смешанный устройства занимают промежуточное положение.

Пример представления и результаты расчетов операционных усилителей (ОУ) при проектировании в САПР OrCAD




А. Идеализированный ОУ

Б. Стандартный ОУ фирмы Analog Devices



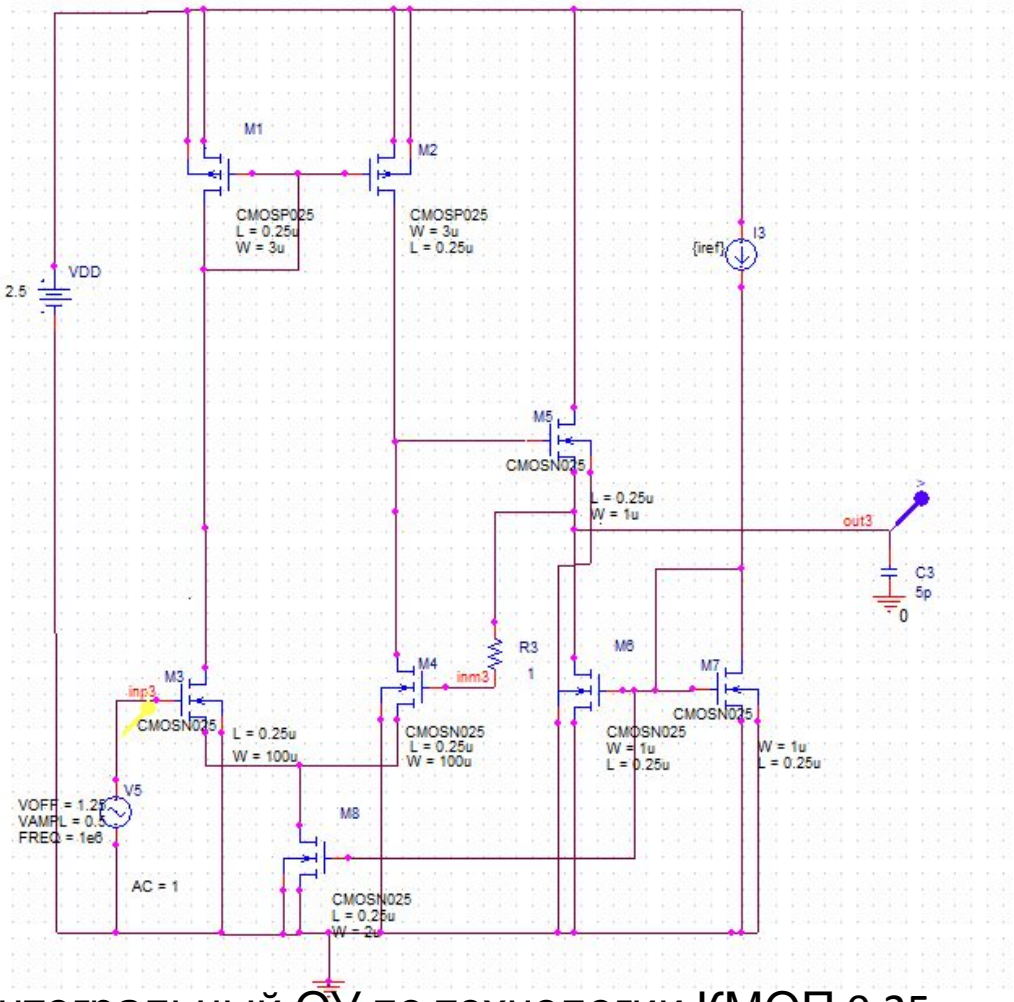




Схема включения – повторитель напряжения. Во всех случаях эта функция реализуется, но хуже всего – в случае Б (прецизионный ОУ ADL1702 с частотой единичного усиления 1,5 МГц)

В. Интегральный ОУ по технологии КМОП 0,25 мкм

# ТЕМА 2. Разновидности ИС по функциям, степени интеграции, типу используемых активных элементов и способам проектирования

1. В чем состоят отличия и сходство аналогового и цифрового компараторов?
https://wikichi.ru/wiki/Comparator
2. Ориентируясь на материал по ссылке, кратко сформулируйте причины преобладания при изготовлении ИС КМОП технологии над биполярной.
https://habr.com/ru/post/448320/
3.Что означает сокращения BIST в структуре ИС типа система на кристалле на слайде 9 и как работают соответствующие периферийные структуры?
4. Что такое IP- (или сложно-функциональные) блоки, каковы их разновидности и как их применение способствует упрощению проектирования ИС?
https://ru.wikipedia.org/wiki/IP-cores
5. Какие особенности схем Б и В на слайде 10 приводят к необходимости задания разных значений напряжений смещения (VOFF) у генераторов синусоидальных тестовых сигналов на входах этих схем?

Рекомендуется самостоятельное более детальное изучение рассматриваемых тем по ссылкам по ходу презентации, а также подготовка ответов на дополнительные вопросы на слайдах 7,11 с сохранением этих ответов в электронном виде (без отсылки преподавателю). В дальнейшем текущий уровень знаний будет контролироваться индивидуально в ходе очных занятий по расписанию и заочных тестовых заданий.