

Часть 1. Введение, основные понятия (термины).

- Этапы развития вычислительных устройств / (микро, нано)электроники.
- Технологические процессы полупроводникового производства, фабрики и САПР.
- Полупроводники р и п типа, их свойства. Транзисторы. Физическая реализация логических элементов.
- Базовые этапы проектирования электроники. Методы разработки современной цифровой электроники.

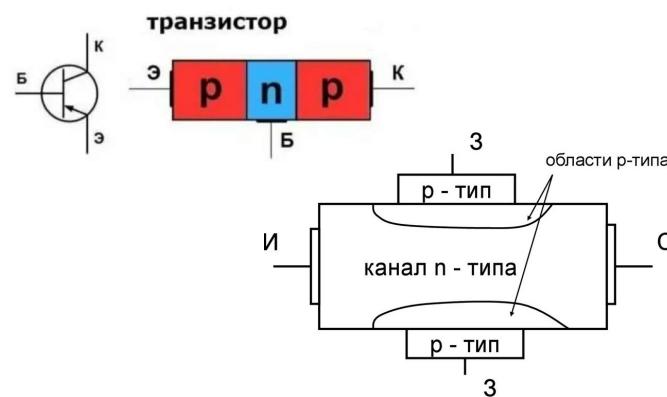
От механических счетных устройств... ... до электронных цифровых суперкомпьютеров



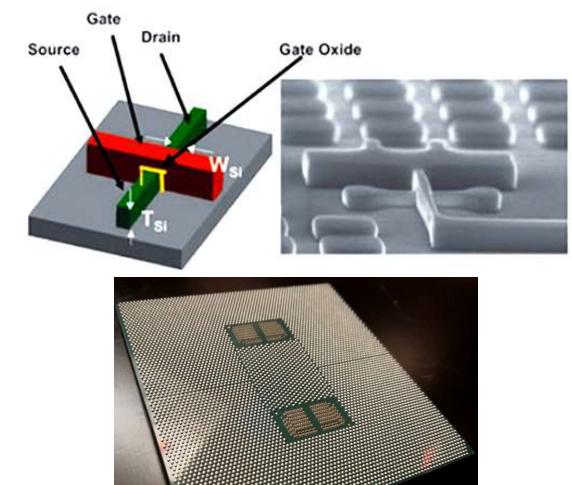
радиоэлектроника -> микро(нано)электроника



Радиолампа, работает за счёт **управления** интенсивностью потока электронов, движущихся в вакууме между электродами



Транзистор, током базы (или напряжением на затворе)
управляется ток в электрической цепи эмиттер-коллектор (или исток-сток)



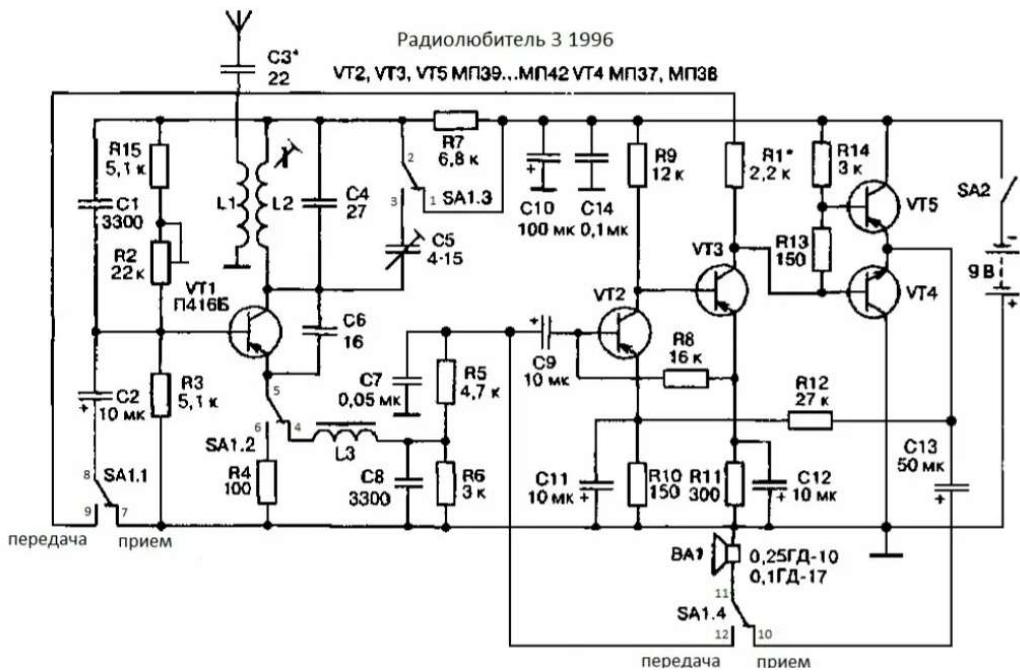
СБИС высокой степени интеграции, с использованием трехмерных транзисторов (16 – 3 нм технологии).

Степень интеграции микросхем (ИС)

- Первая половина 60-х годов, характеризуется степенью интеграции ИС до 100 элементов / кристалл и минимальным размером элементов порядка 10 мкм.
- Вторая половина 60-х годов и первая половина 70-х годов, характеризуется степенью интеграции ИС от 100 до 1000 элементов/кристалл и минимальным размером элементов до 2 мкм.
- Со второй половины 70-х годов, степенью интеграции превысила 1000 элементов/кристалл. Минимальный размер элементов до 1 мкм.
- Начало разработки **сверхбольших ИС** со степенью интеграции более 10000 элементов/кристалл и размерами элементов 0,1 – 0,2 мкм.
- Современный, этап характеризуется широким использованием микропроцессоров и микро-ЭВМ, разработанных на базе больших и сверхбольших ИС (более триллиона элементов/кристалл).

Влияние степени интеграции устройств на методы разработки

Схематическое описание



Функциональное описание

Описание модулей устройств:

Устройство1 (вход1, вход2, выход1, выход2);

выход1 = функция1(вход1, вход2);

выход2 = функция2(вход1, вход2);

Конец описания

Описание иерархии устройств:

Устройство2 (вход1, вход2, вход3, вход4,

выход1, выход2, выход3, выход4)

Устройство1 (вход1, вход2, выход1,
выход2);

Устройство1 (вход3, вход4, выход3,
выход4);

Конец описания

Языки описания аппаратуры

Язык описания аппаратуры (HDL от англ. hardware description language) — специализированный компьютерный язык, используемый для описания структуры и поведения электронных схем (цифровых логических схем).

Первый современный HDL — Verilog, был создан Gateway Design Automation в 1985 году для описания СБИС. В 1987 году по заказу Министерства обороны США на основе языка Ада был разработан язык VHDL.

Verilog, и VHDL изначально использовались для документирования и моделирования схемных решений. Моделирование при помощи HDL позволило инженерам работать на более высоком уровне абстракции, чем моделирование на уровне схемы, и, следовательно, упростить моделирование проектов, состоящих из тысяч транзисторов и более.

Сейчас Verilog, и VHDL основные языки описания цифровых устройств , все современные САПР их поддерживают.

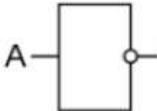
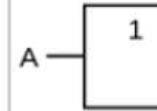
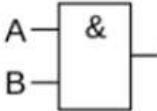
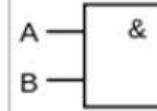
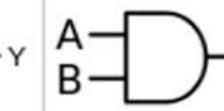
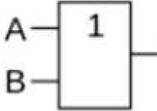
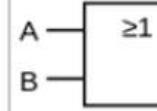
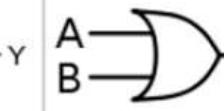
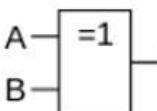
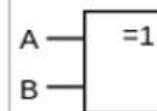
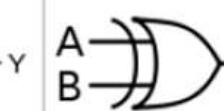
Функциональное описание устройства на Verilog или VHDL называют **RTL** (Register transfer level) описание работы синхронной цифровой схемы.

Бинарная (двоичная) логика

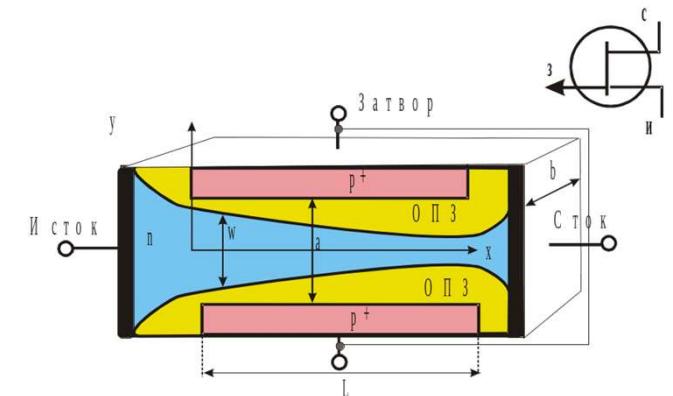
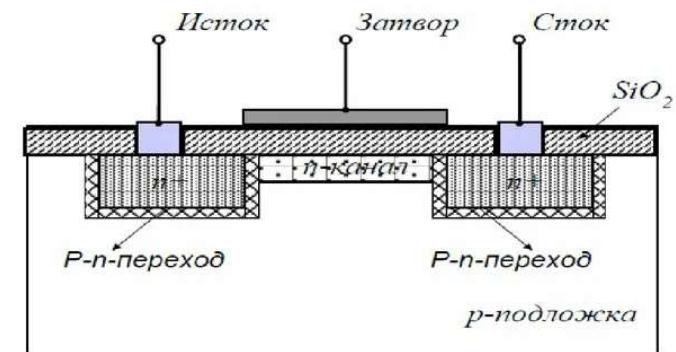
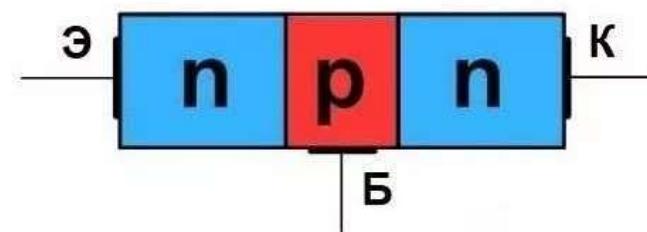
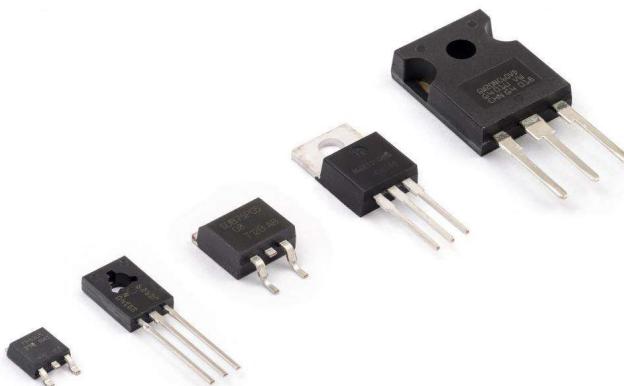
Двоичная логика основана на двух утверждениях: **Истина** (логическая единица) и **ложь** (логический нуль). Из за простоты реализации получила широкое распространение в вычислительной технике – **цифровая электроника**.

- Значение операнда может быть только «0» или «1».
- При разработке цифровых устройств наиболее часто применяются 4 типа логических операций:
 1. Отрицание («НЕ»)
 2. конъюнкция («И» или умножение)
 3. дизъюнкция («ИЛИ» или сложение)
 4. XOR («Исключающее ИЛИ»)
- Существуют правила преобразований (минимизаций) логических выражений.

Таблица истинности логических элементов

Логический вентиль	Условные графические обозначения			Функция	Таблица истинности															
	ГОСТ 2.743-91	IEC 60617-12 : 1997	US ANSI 91-1984																	
НЕ (англ. NOT gate)				Отрицание $Y = \bar{A}$ $Y = \neg A$ $Y = \tilde{A}$	<table border="1" data-bbox="1695 404 1830 547"> <tr> <td>A</td> <td>Y</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </table>	A	Y	0	1	1	0									
A	Y																			
0	1																			
1	0																			
И (англ. AND gate)				Конъюнкция $Y = A \wedge B$ $Y = A \cdot B$ $Y = A \& B$ $Y = AB$	<table border="1" data-bbox="1695 563 1830 801"> <tr> <td>A</td> <td>B</td> <td>Y</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </table>	A	B	Y	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1
A	B	Y																		
0	0	0																		
0	1	0																		
1	0	0																		
1	1	1																		
ИЛИ (англ. OR gate)				Дизъюнкция $Y = A \vee B$ $Y = A + B$	<table border="1" data-bbox="1695 809 1830 1048"> <tr> <td>A</td> <td>B</td> <td>Y</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> </table>	A	B	Y	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1
A	B	Y																		
0	0	0																		
0	1	1																		
1	0	1																		
1	1	1																		
Исключающее ИЛИ (англ. XOR gate) сложение по модулю 2				Строгая дизъюнкция $Y = A \vee B$ $Y = A \oplus B$	<table border="1" data-bbox="1695 1056 1830 1294"> <tr> <td>A</td> <td>B</td> <td>Y</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </table>	A	B	Y	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0
A	B	Y																		
0	0	0																		
0	1	1																		
1	0	1																		
1	1	0																		

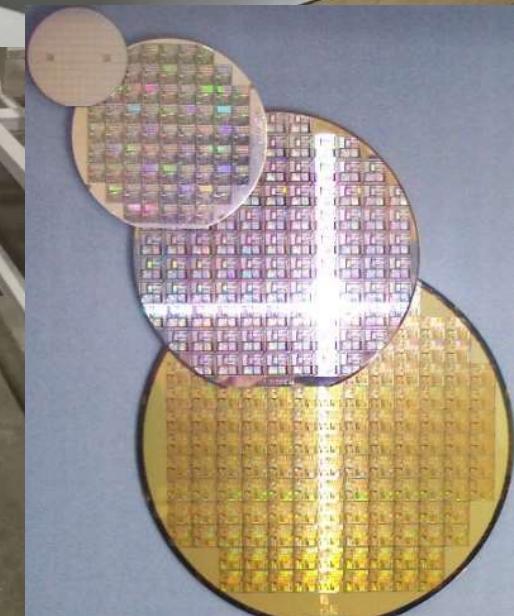
Физическая реализация логических элементов на транзисторах



Технологические процессы полупроводникового производства



Кремний Si



Технологические процессы полупроводникового производства

Техпроцессы 1970—1980-х:

3 мкм — 1975 год, Zilog (Z80) и в 1979 году Intel (Intel 8086). Соответствует линейному разрешению литографического оборудования, примерно равному 3 мкм.

0,6 мкм — техпроцесс, соответствующий уровню технологии, достигнутому в конце 1980-х — начале 1990-х годов компаниями Intel и IBM.

Техпроцессы 1990-х годов: 350 – 130 нм (Intel, IBM, TSMC, Микрон).

Современные техпроцессы менее 100нм:

Массово применяются 90 – 16 нм (Intel, IBM, TSMC, Samsung и др.). С 2010-х годов по настоящее время существуют технологии 12 – 4нм. Опытные образцы производят на 3нм. Исследования – до 1,4нм.

Атом кремния имеет диаметр 0,24 нанометра, таким образом 1 нанометр соответствует 4 атомам кремния в поперечнике. Однако названия последних поколений техпроцессов являются маркетинговыми и не отражают геометрических размеров транзисторов.

Типы применяемых транзисторов

Биполярный транзистор (BJT):

Семейство цифровой логики – TTL (транзисторно-транзисторная логика), применялась при проектировании интегральных схем. Преимущества: долговечность, высокая производительность. Недостатки: потребляемая мощность.

Полевой транзистор (MOSFET):

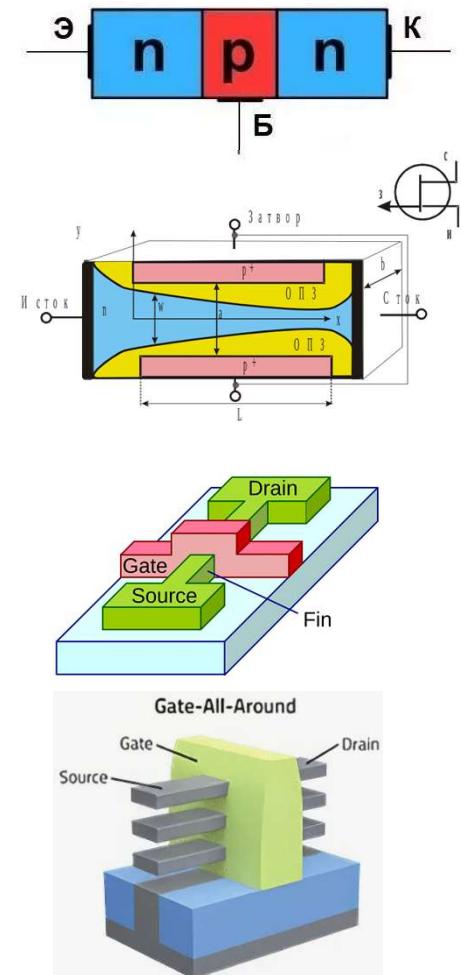
Семейство цифровой логики – CMOS (комплементарный металлоксидный полупроводник), Преимущества : низкое энергопотребление, хорошая помехозащищенность и совместимость с широким диапазоном уровней напряжения. Недостатки: надежность.

Транзистор с вертикально расположенным затвором(FINFET):

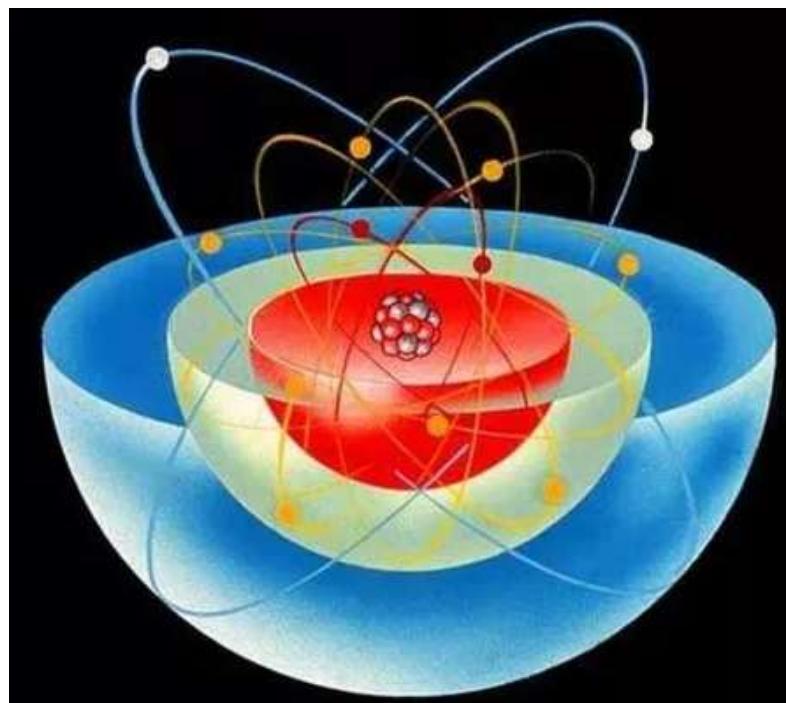
Применяется в технологии 16нм и далее. Преимущества: высокая скорость переключения. Недостатки: высокие паразитные и емкостные характеристики.

GAAFET (Gate-All-Around Field-Effect Transistor):

В 2020 году компании TSMC и Samsung объявили о разработке нового поколения транзисторов. Каналы окружены затворами со всех четырех сторон.



Строение атома



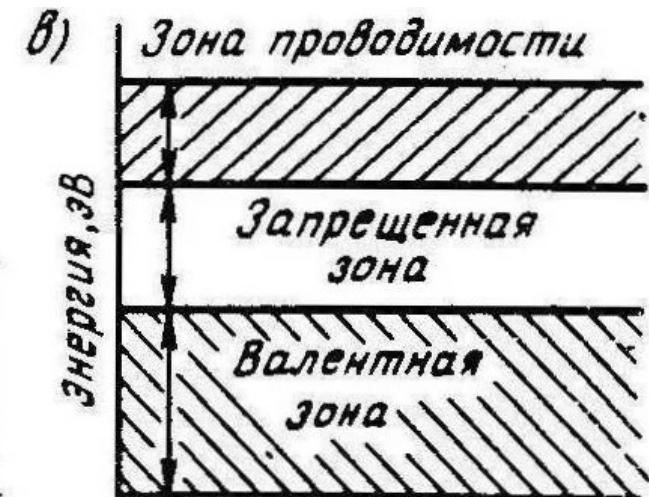
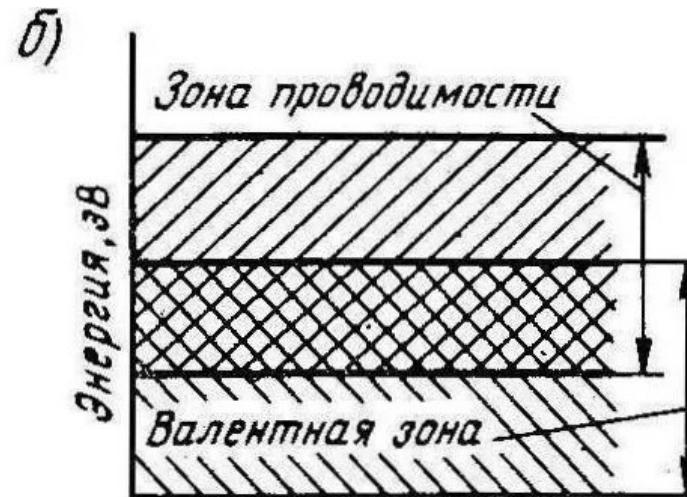
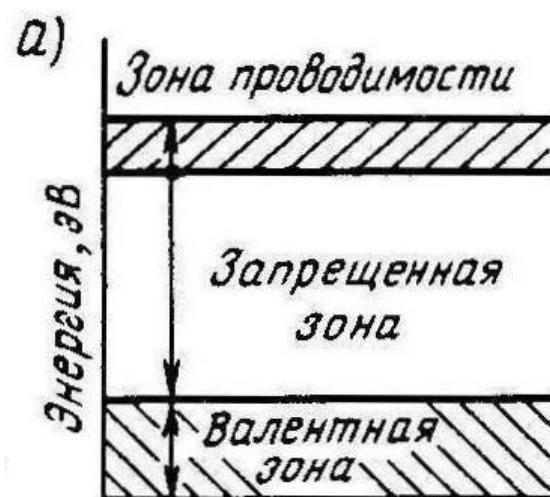
1s² ← число электронов
2s² 2p⁶
3s² 3p⁶ 3d¹⁰
4s² 4p⁶ 4d¹⁰ 4f¹⁴

1 уровень = max. 2 электрона
2 уровень = max. 8 электронов
3 уровень = max. 18 электронов
4 уровень = max. 32 электрона

Группа → Период ↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H Водород																	2 He Гелий
2	3 Li Литий	4 Be Бериллий											5 B Бор	6 C Углерод	7 N Азот	8 O Кислород	9 F Фтор	10 Ne Неон
3	11 Na Натрий	12 Mg Магний											13 Al Алюминий	14 Si Кремний	15 P Фосфор	16 S Сера	17 Cl Хлор	18 Ar Аргон
4	19 K Калий	20 Ca Кальций	21 Sc Скандий	22 Ti Титан	23 V Ванадий	24 Cr Хром	25 Mn Марганец	26 Fe Железо	27 Co Кобальт	28 Ni Никель	29 Cu Медь	30 Zn Цинк	31 Ga Галлий	32 Ge Германий	33 As Мышьяк	34 Se Селен	35 Br Бром	36 Kr Криптон
5	37 Rb Рубидий	38 Sr Стронций	39 Y Иттрий	40 Zr Цирконий	41 Nb Ниобий	42 Mo Молибден	43 Tc Технеций	44 Ru Рутений	45 Rh Родий	46 Pd Палладий	47 Ag Серебро	48 Cd Кадмий	49 In Индий	50 Sn Олово	51 Sb Сурьма	52 Te Теллур	53 I Иод	54 Xe Ксенон
6	55 Cs Цезий	56 Ba Барий	*	72 Hf Гафний	73 Ta Тантал	74 W Вольфрам	75 Re Рений	76 Os Оsmий	77 Ir Иридий	78 Pt Платина	79 Au Золото	80 Hg Ртуть	81 Tl Таллий	82 Pb Свинец	83 Bi Бисмут	84 Po Полоний	85 At Астат	86 Rn Радон
7	87 Fr Франций	88 Ra Радий	**	104 Rf Резерфордий	105 Db Дубний	106 Sg Сиборгий	107 Bh Борий	108 Hs Хассий	109 Mt Мейтнерий	110 Ds Дармштадтий	111 Rg Рентгений	112 Cn Коперниций	113 Nh Нихоний	114 Fl Флеровий	115 Mc Московий	116 Lv Ливерморий	117 Ts Теннессин	118 Og Оганесон
Лантаноиды *			57 La Лантан	58 Ce Церий	59 Pr Празеодим	60 Nd Неодим	61 Pm Прометий	62 Sm Самарий	63 Eu Европий	64 Gd Гадолиний	65 Tb Тербий	66 Dy Диспрозий	67 Ho Гольмий	68 Er Эрбий	69 Tm Тулий	70 Yb Иттербий	71 Lu Лютенций	
Актиноиды **			89 Ac Актиний	90 Th Торий	91 Pa Протактиний	92 U Уран	93 Np Нептуний	94 Pu Плутоний	95 Am Америций	96 Cm Кюрий	97 Bk Берклий	98 Cf Калифорний	99 Es Эйнштейний	100 Fm Фермий	101 Md Менделевий	102 No Нобелий	103 Lr Лоуренсий	

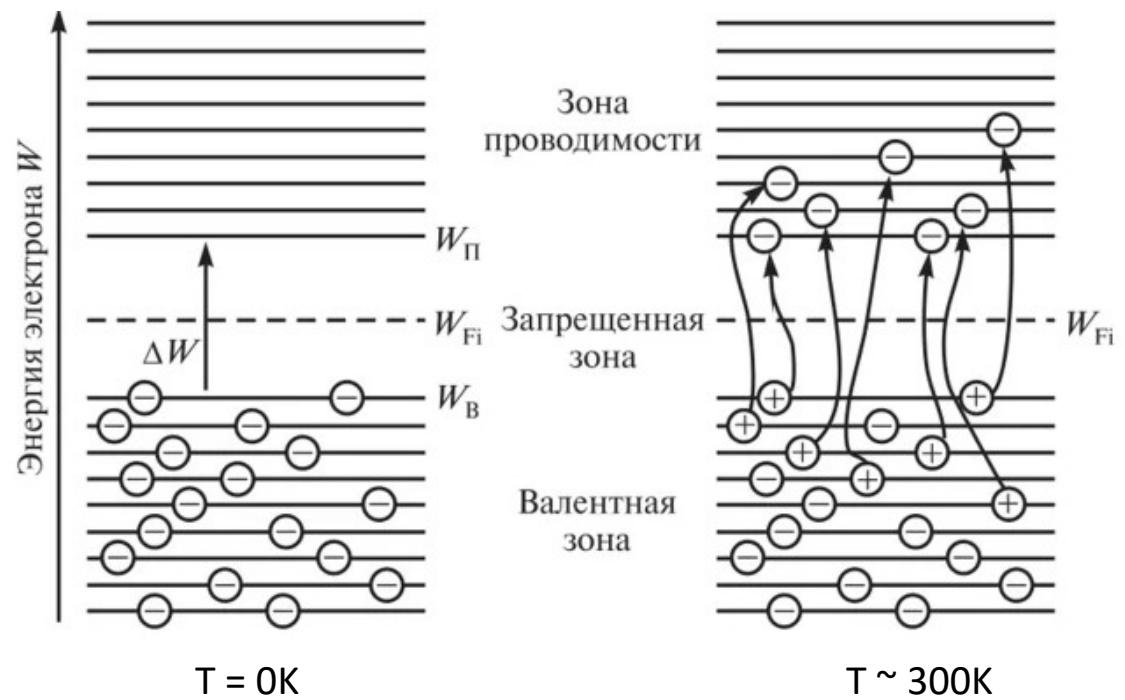
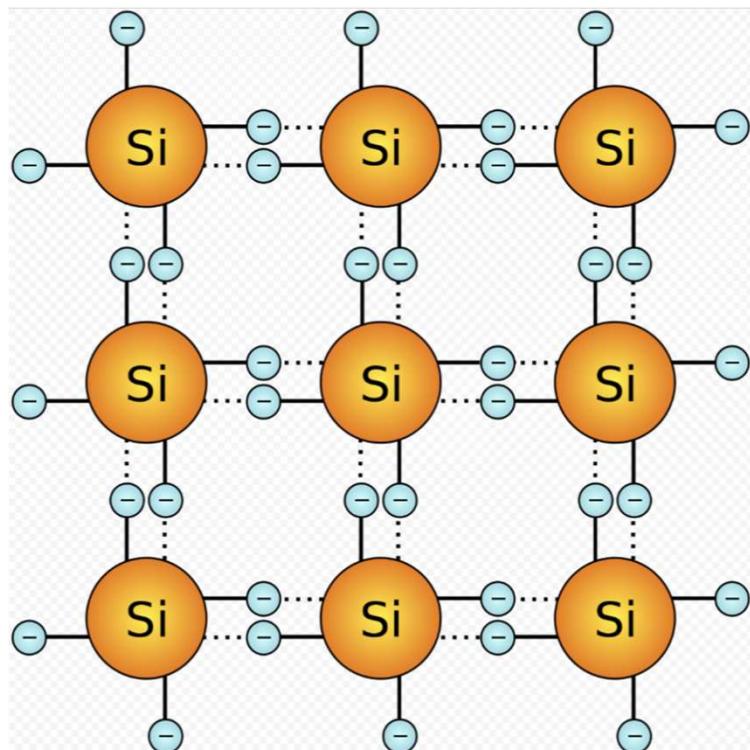
п • с • р		Семейства химических элементов															
		Щелочные металлы															Галогены
		Щёлочноземельные металлы															Благородные газы
		Переходные металлы															Лантаноиды
		Постпереходные металлы															Актиноиды
		Полуметаллы — металлоиды															Суперактиноиды
		Другие неметаллы (16-я (VI) группа — халькогены)															

Зонные диаграммы элементов

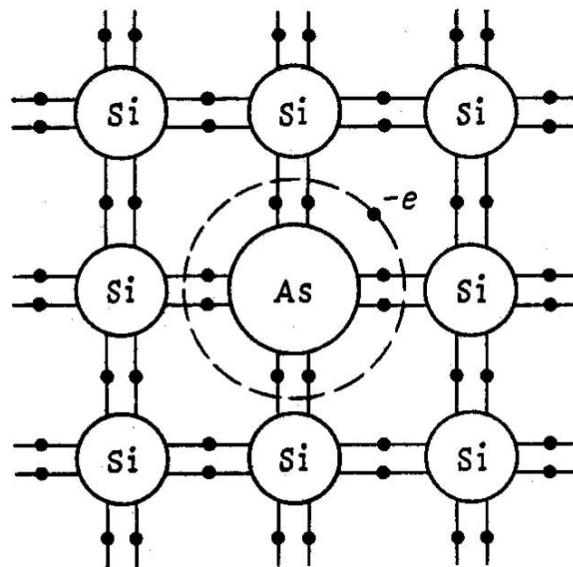


Энергетические зоны изолятора (а), проводника (б) и полупроводника (в)

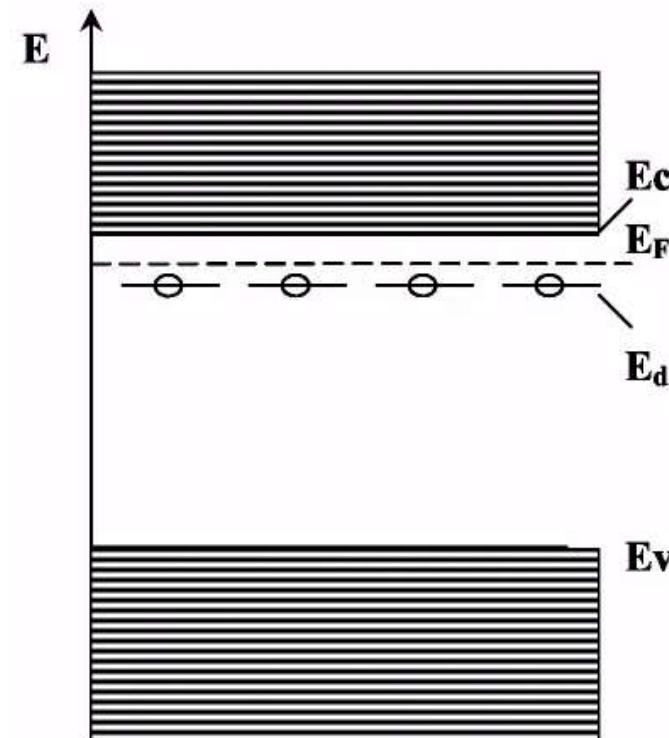
Кремний Si



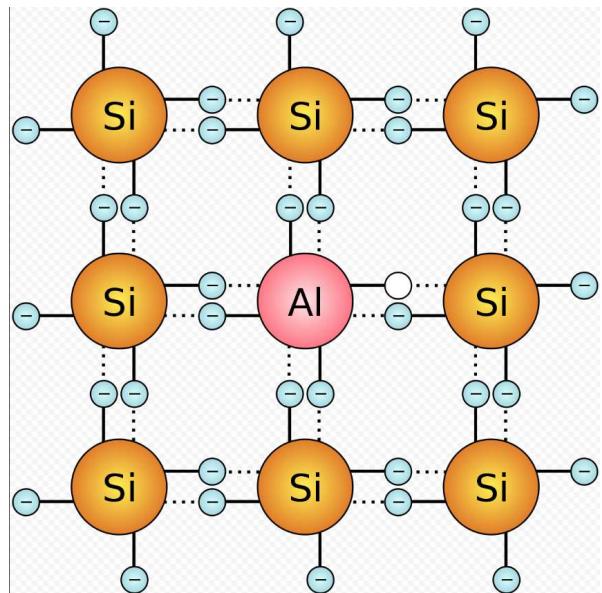
Полупроводник n типа



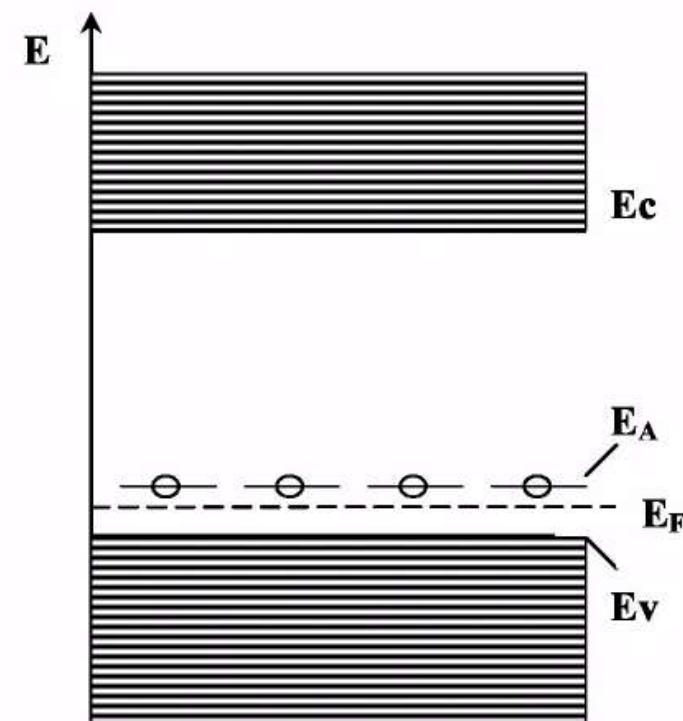
Донорная примесь,
основными носителями заряда
являются электроны



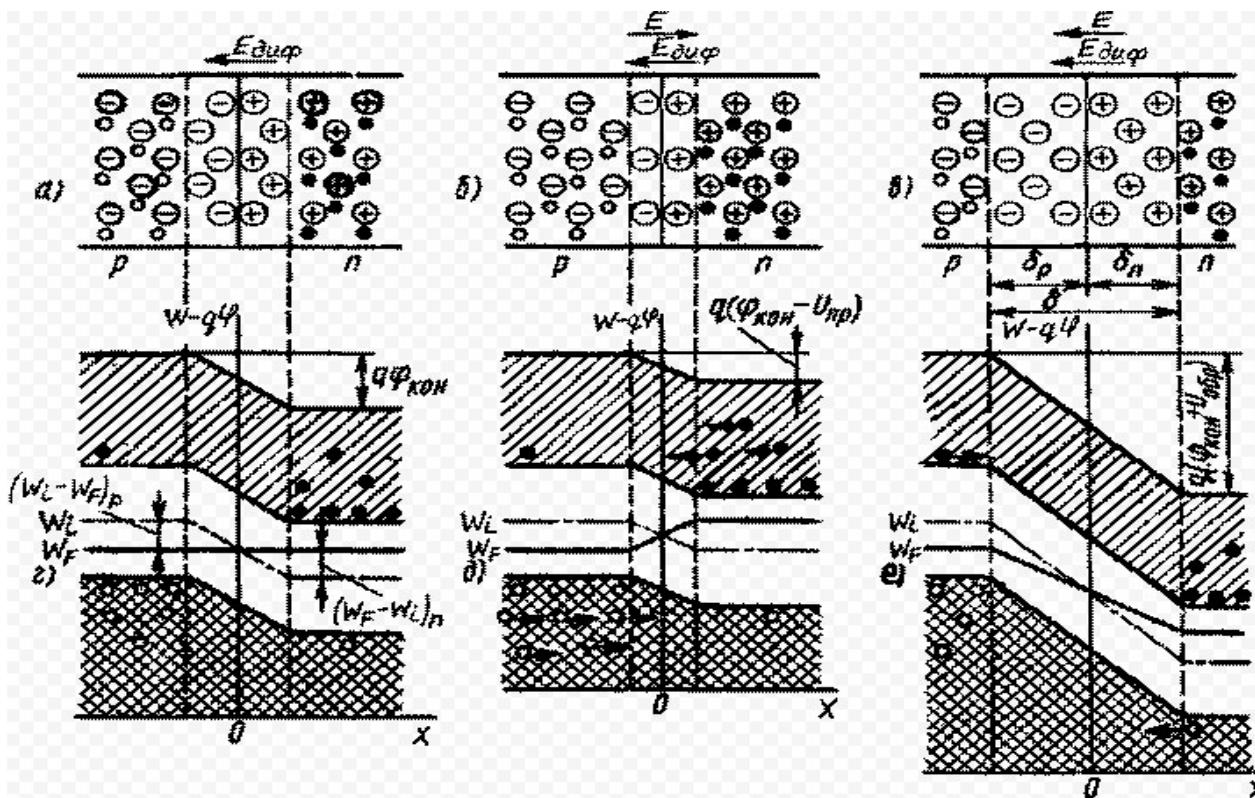
Полупроводник р типа



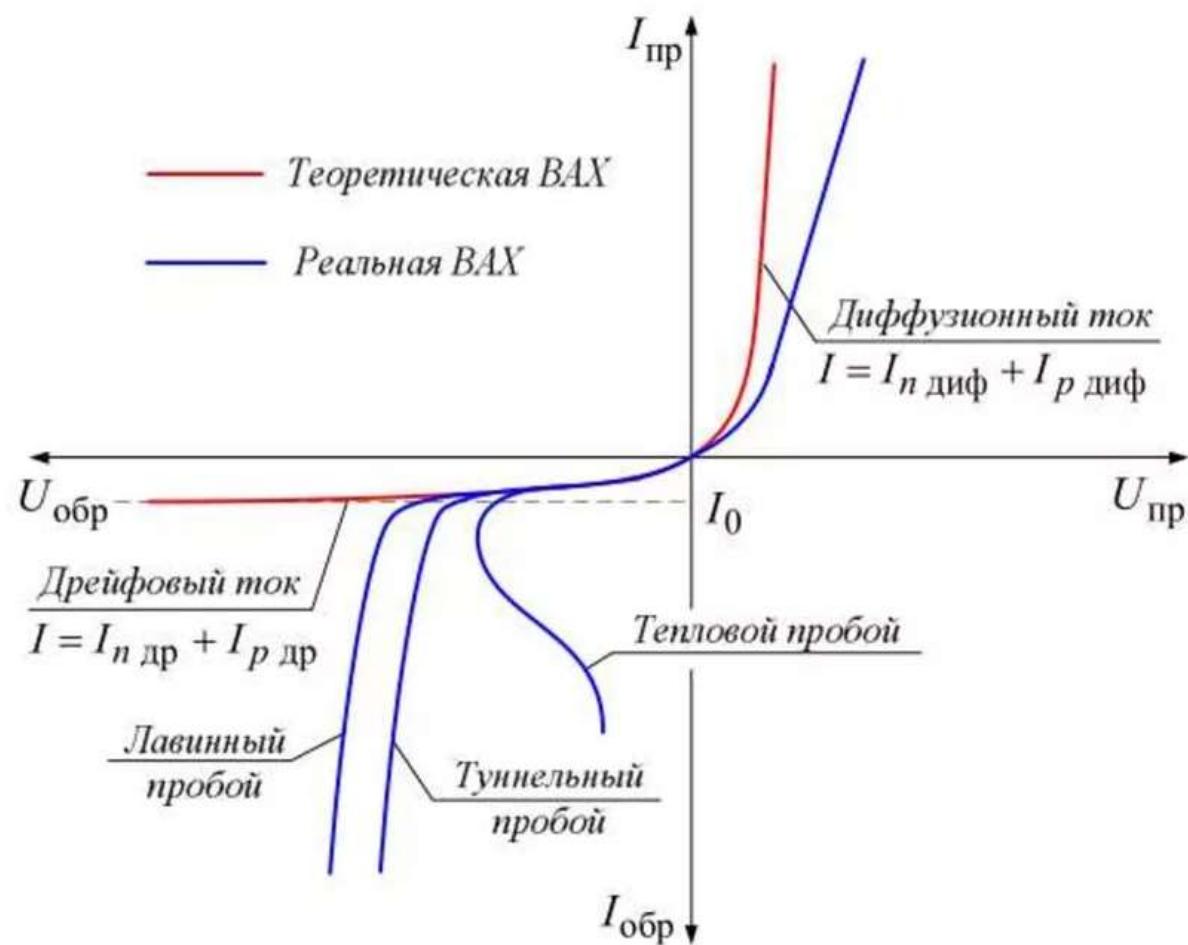
Акцепторная примесь,
основными носителями заряда
являются дырки



р-п переход

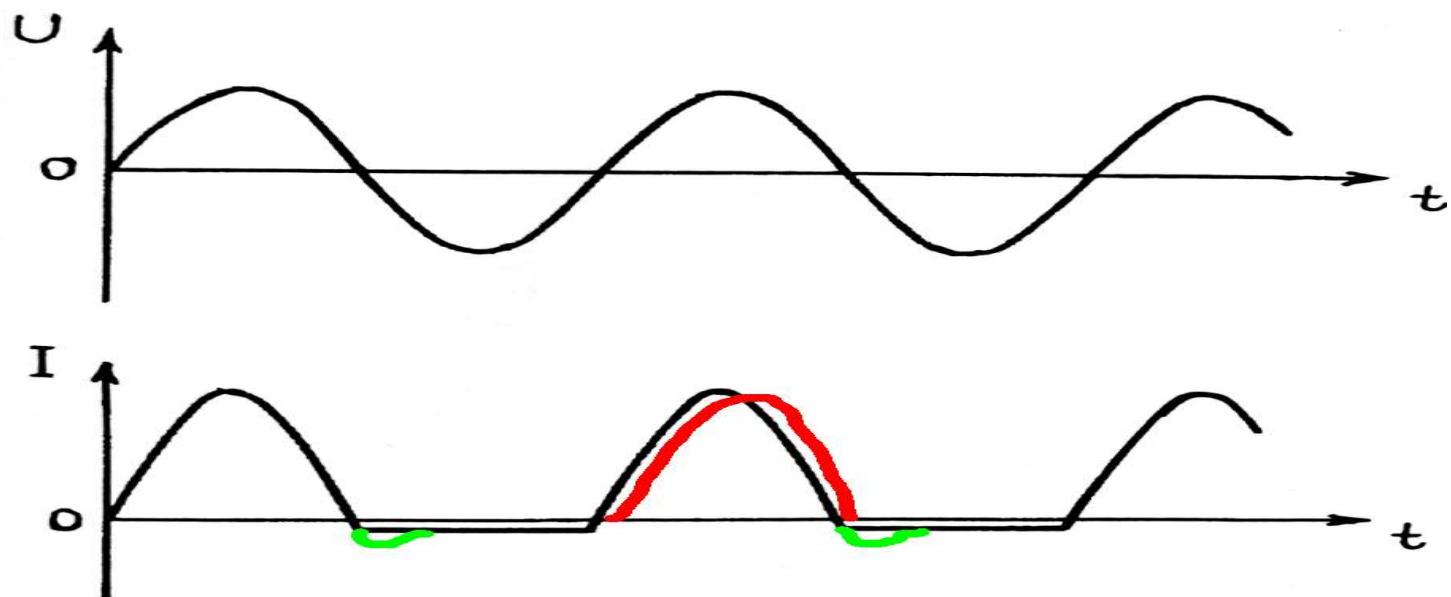


ВАХ р-п перехода

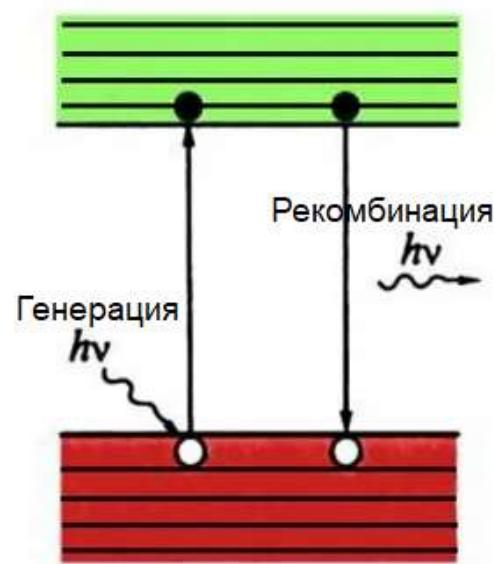


Динамические характеристики р-п перехода

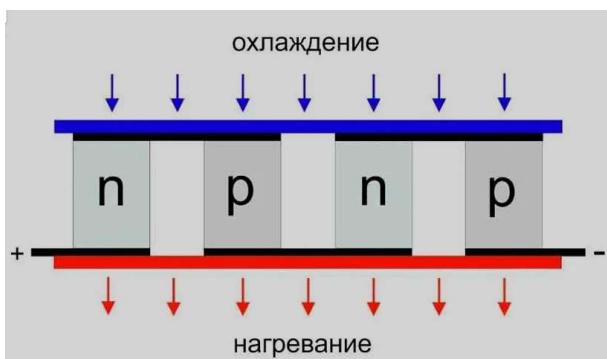
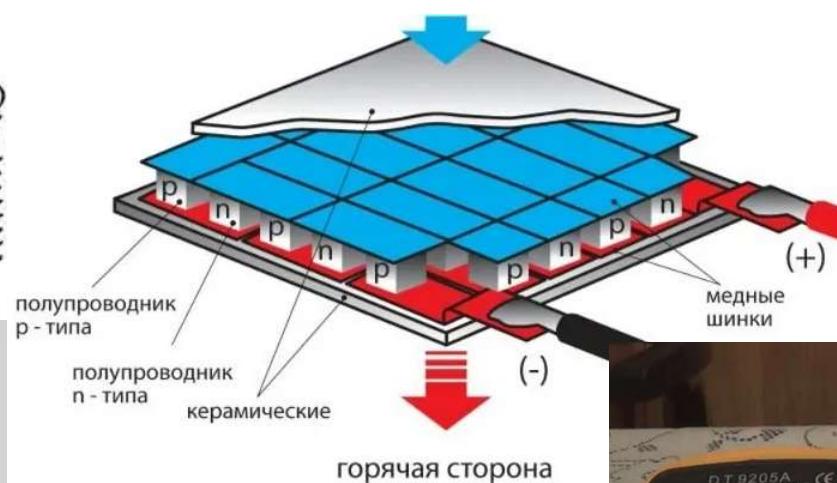
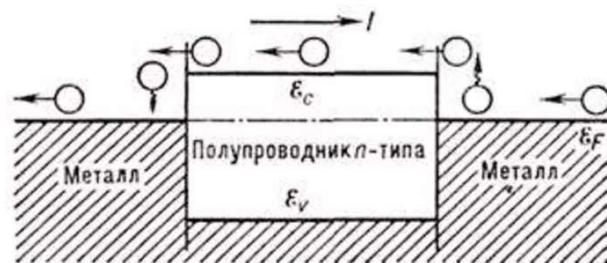
Барьерная ёмкость связана с изменением потенциального барьера в переходе и возникает при обратном смещении.
Диффузионная ёмкость обусловлена накоплением в области неосновных для неё носителей (электронов в р-области и дырок в п-области) при прямом смещении. Диффузионная ёмкость увеличивается с ростом прямого напряжения.



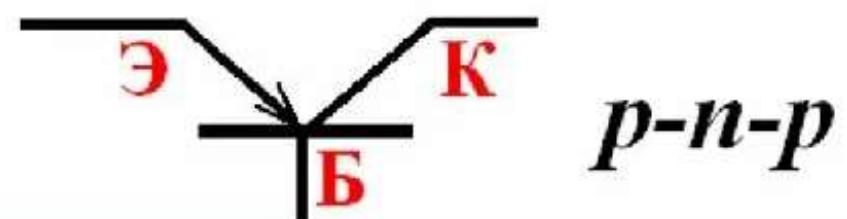
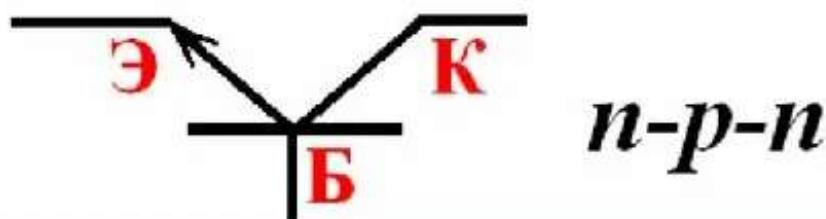
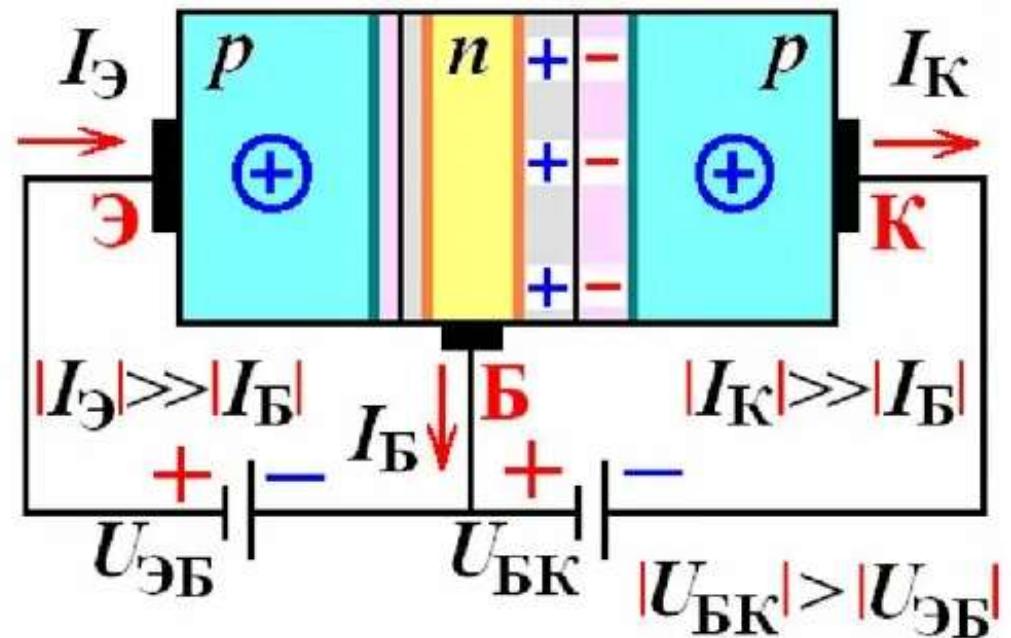
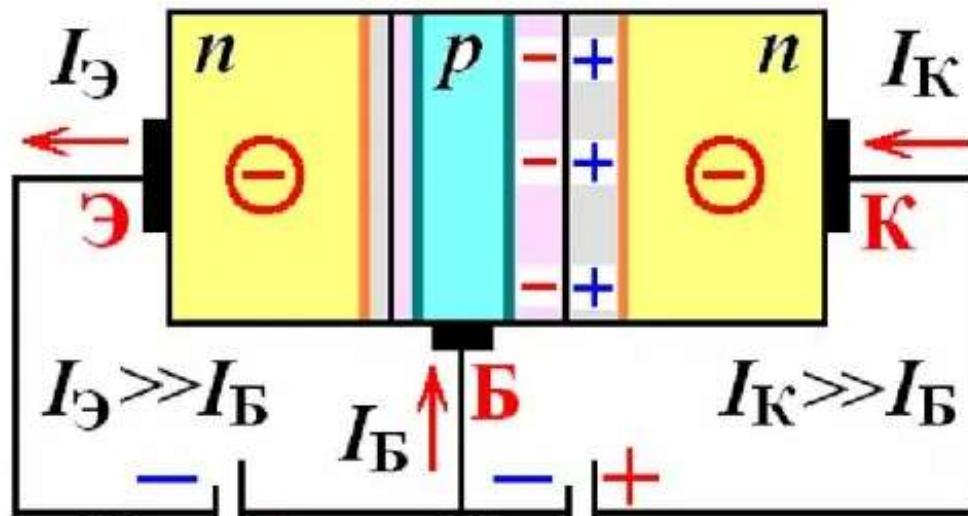
Генерация и рекомбинация в полупроводниках



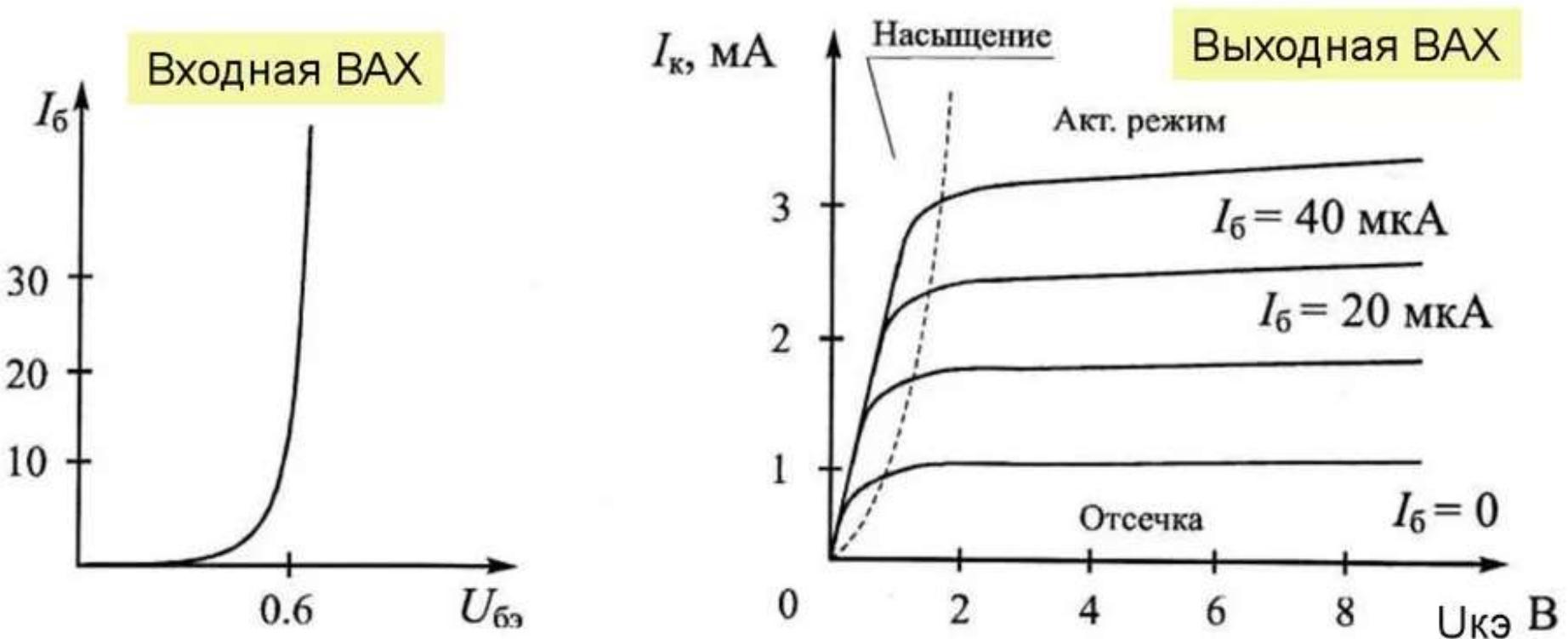
Эффект Пельтье (обратный - Зеебека)



npn(pnp) переход – биполярный транзистор



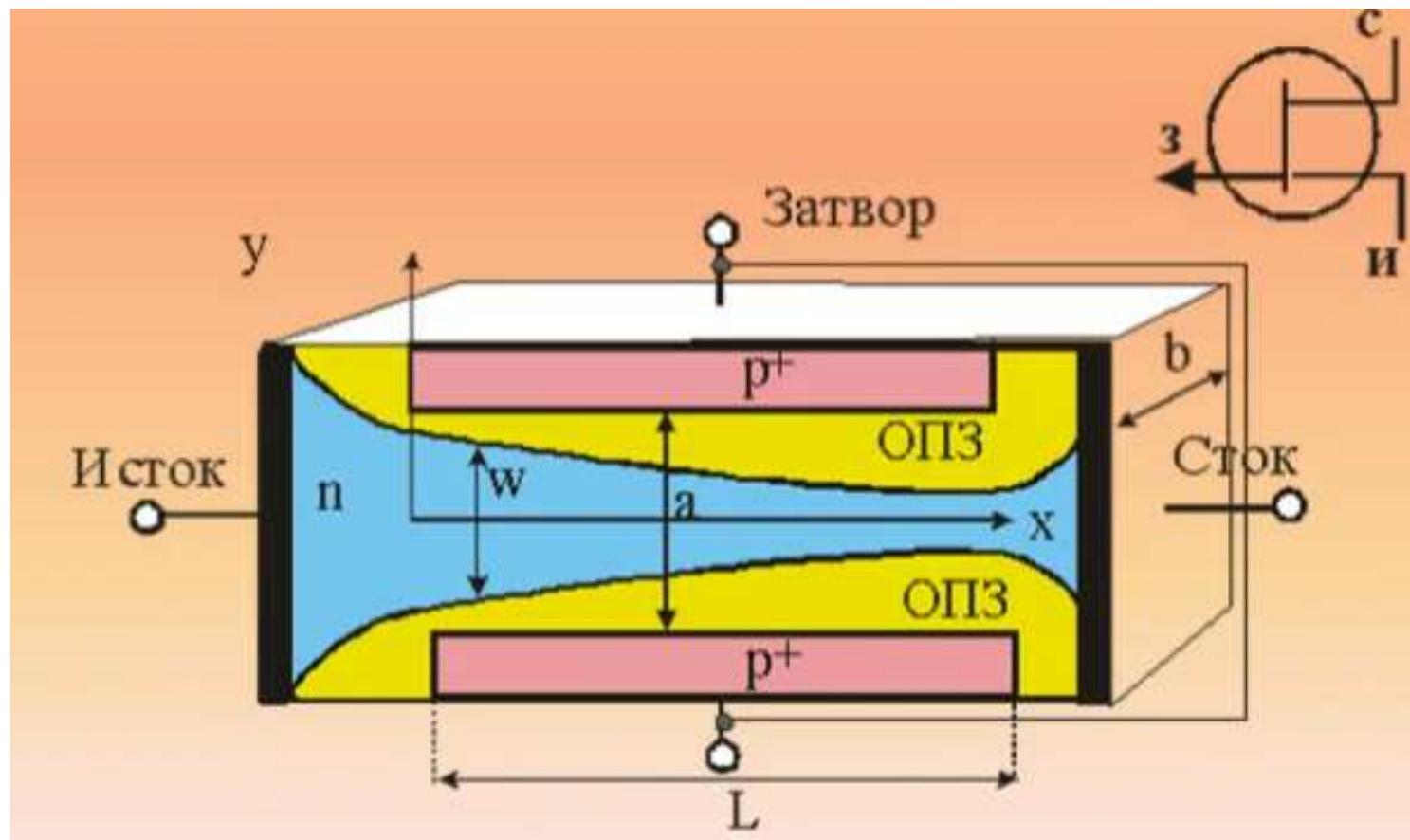
ВАХ биполярного транзистора



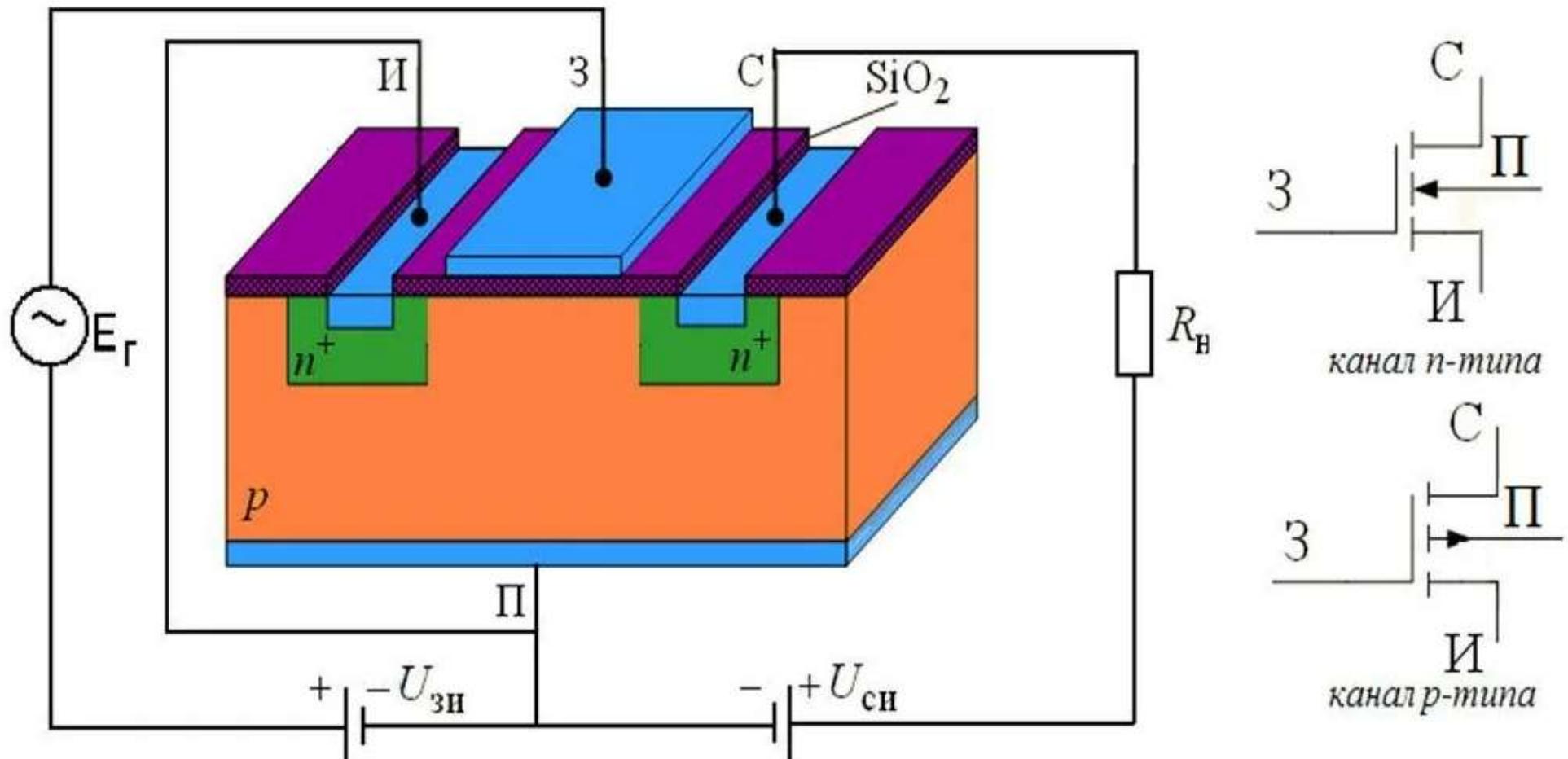
$$I_6 = f(U_{6\beta}) \quad |U_{k\beta} = \text{const}$$

$$I_k = f(U_{k\beta}) \quad |I_6 = \text{const}$$

Полевой транзистор



МДП(МОП) транзистор с индуцированным каналом



ВАХ МДП транзистора с индуцированным каналом

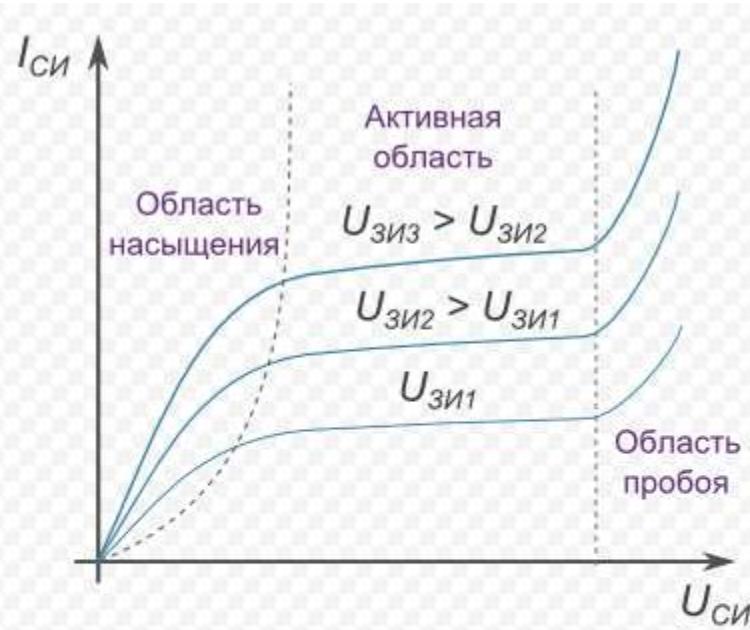


График а)

Стоковые (выходные) характеристики
МДП-транзистора с индуцированным
каналом

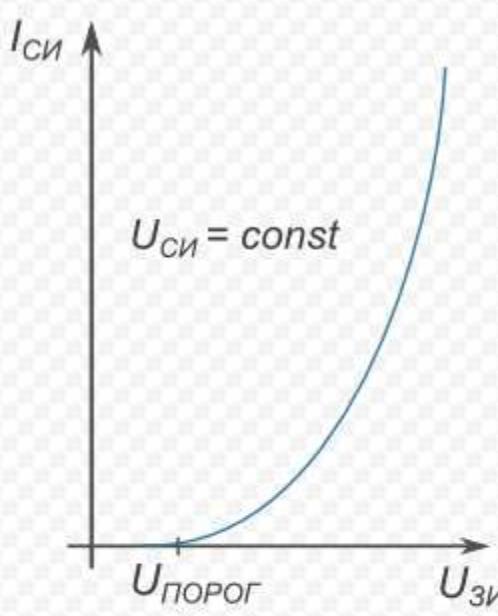


График б)

Стоко-затворная характеристика
МДП-транзистора с индуцированным
каналом

Базовые этапы проектирования электроники

- Разработка и согласование технического задания(ТЗ)
- Проработка маршрута проектирования для выполнения ТЗ (эскизный проект, технический проект)
- Логическое проектирование
- Логическое моделирование и прототипирование
- Физическое проектирование
- Физическое моделирование
- Разработка конструкторской и эксплуатационной документации
- Производство опытного образца
- Проведение испытаний и внесение исправлений по их итогам
- Освоение серийного производства
- Поддержка жизненного цикла продукции