

**Базовая КМОП-технология**

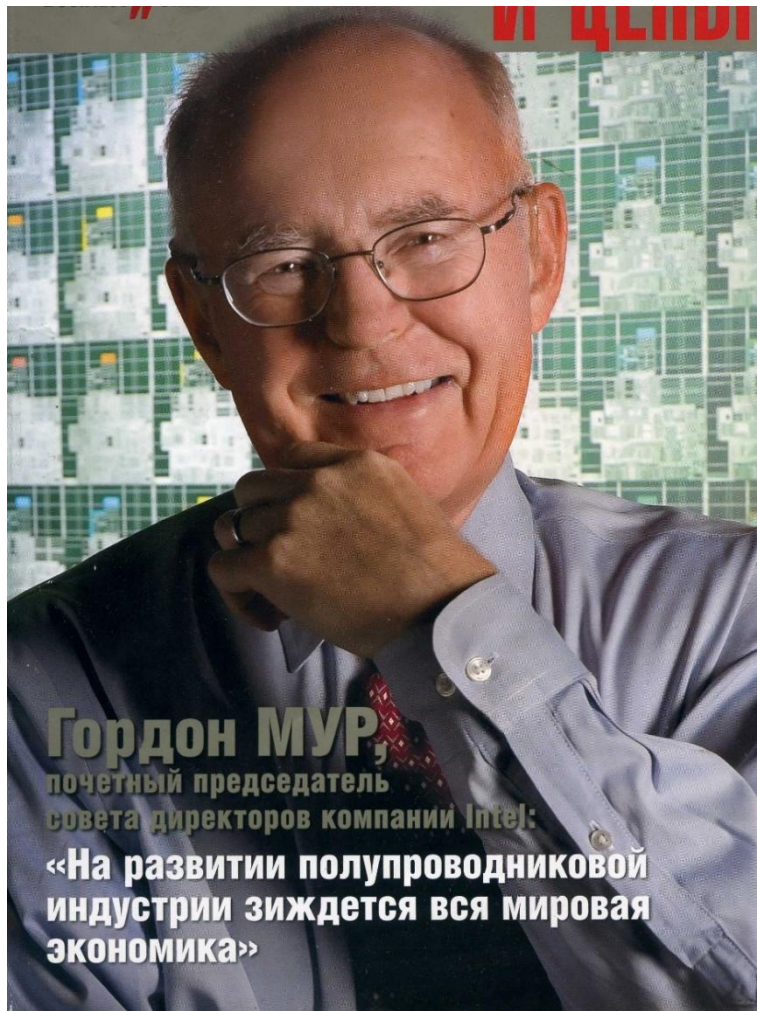
**курс лекций**

**лектор**

**профессор М.А.Королев**

# Лекция 1

Тенденции развития конструктивно-технологических  
решений при создании СБИС



**Гордон МУР,**

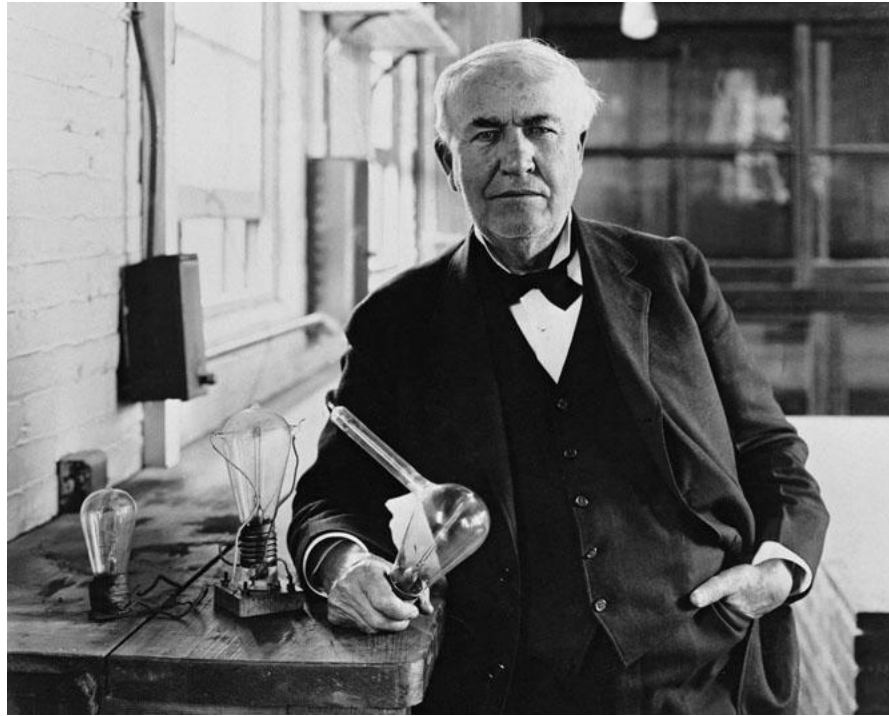
почетный председатель  
совета директоров компании Intel:

**«На развитии полупроводниковой  
индустрии зиждется вся мировая  
экономика»»**

# Два колеса Человечества



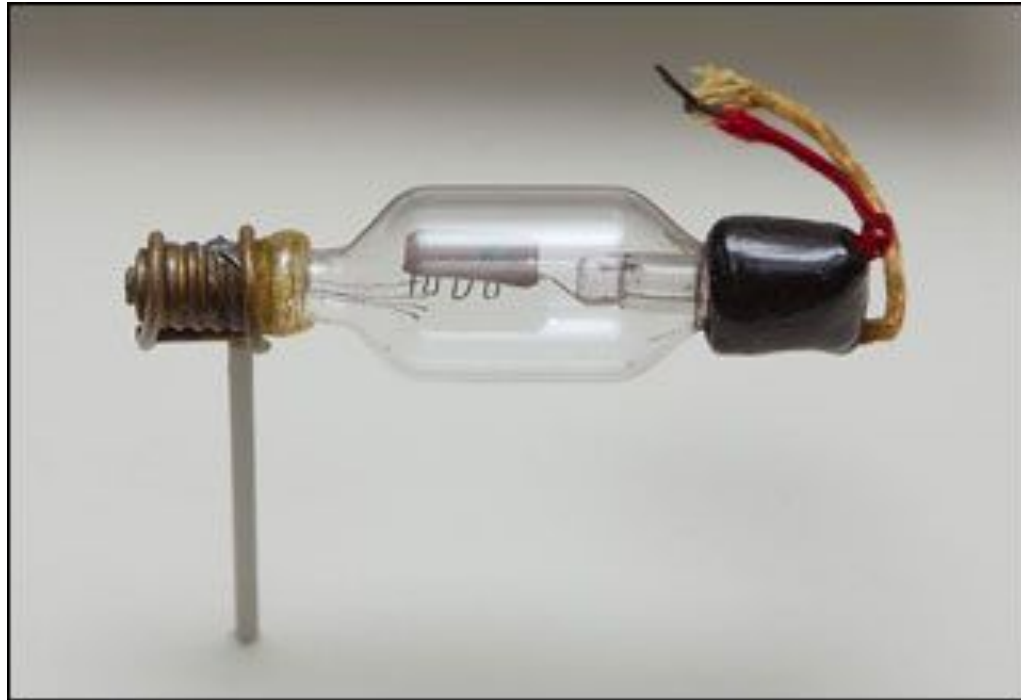
# Эдисон и его лампа (1879 год)



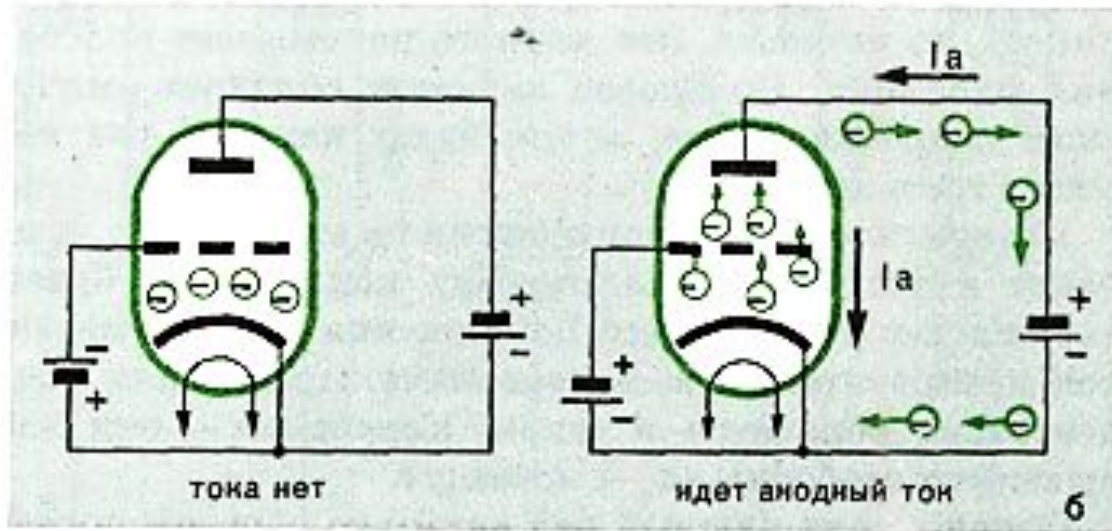
# Диод Флеминга (1906 год)



# Триод Ли де Фореста (1907 год)



# Принцип работы электронной вакуумной лампы

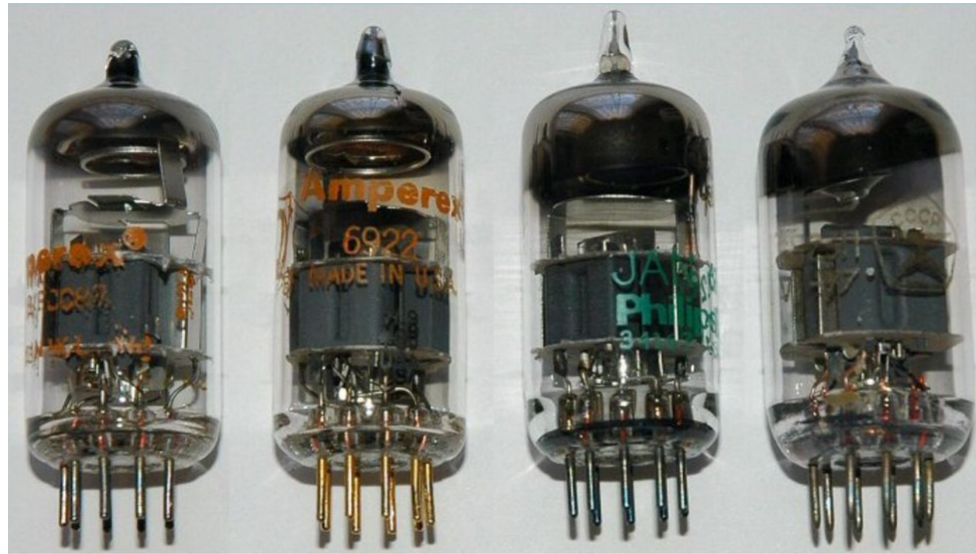




# Электронная вакуумная лампа



# Миниатюрные «пальчиковые» лампы



# Радиоприемник на электронных лампах

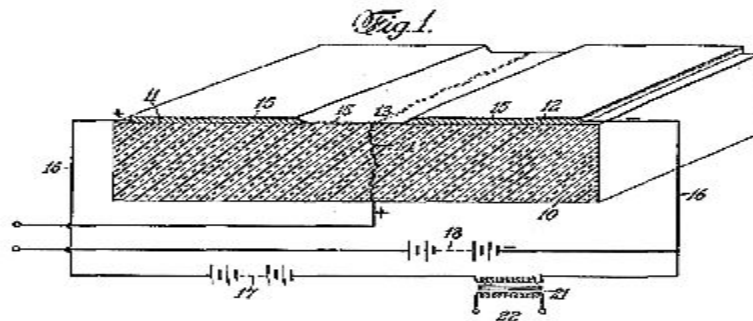


# ENIAC – первый цифровой ламповый компьютер (1944год) 18000 ламп



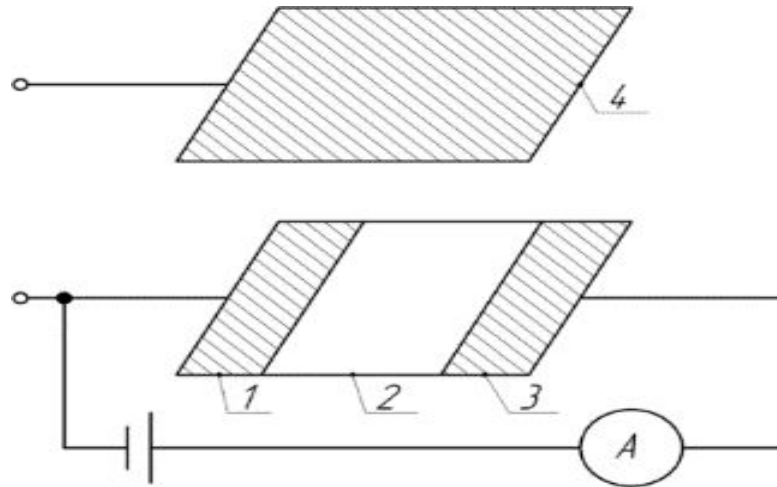
# Нереализованный «полевой транзистор» Лиленфельда.

Jan. 28, 1930. J. E. LILIENFELD 1,745,175  
METHOD AND APPARATUS FOR CONTROLLING ELECTRIC CURRENTS  
Filed Oct. 8, 1926



Патент США 1 745 175 на «метод и устройство управления электрическими токами» с приоритетом от 8 октября 1926 года

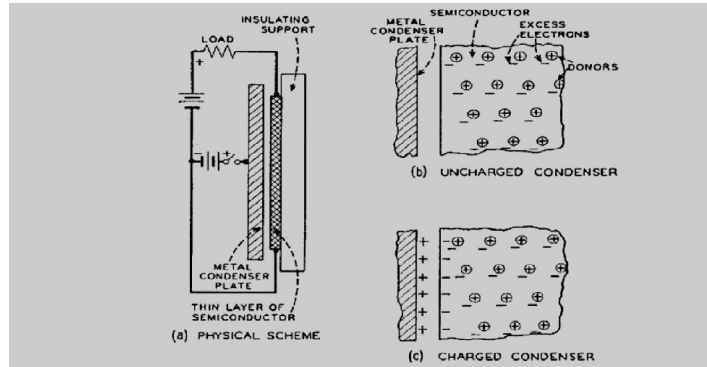
# Принцип работы полевого транзистора



# Точечный диод Шоттки (1940 год)



# Патент В.Шокли на МДП- транзистор (1943 год)



605

From pg 27 we expect fraction of electrons  
 affected to be:  $E_{used} / E_p$   

$$n_{eff} = \frac{E_p}{\mu R C} = \frac{1.12 \times 10^{12} \text{ e}}{100 \times 10^7 \times 0.6 \text{ cm}} \approx 10^4$$
  
 we used about 600 volts and 1.5 mm or 4000 volts/cm.  
 or 40%  $E_p$ . we expect about 1/2 effect.  
 Observed top pg 35 was about 1/100 or down  
 300-fold. However, later results are at least  
 5 times smaller harder to be nonobservable,  
 i.e. down 1500 fold. 23 June W=5.



# Почему не работал МДП-транзистор

- 

- 

- Полупроводник



Ловушки –  $10^{14}\text{см}^{-2}$

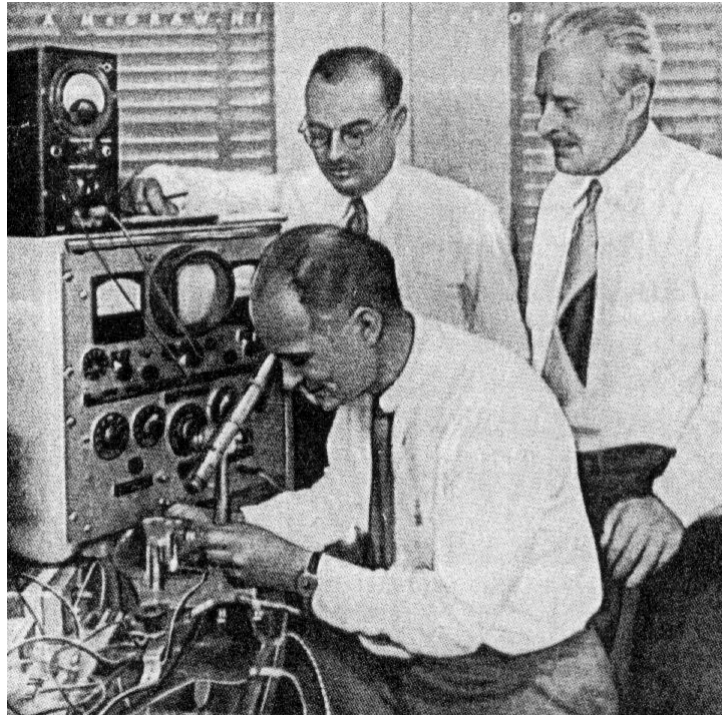
Носители –  $10^{12}\text{см}^{-2}$

- Соотношение между поверхностными ловушками (оборванные связи) и количеством индуцированных полем носителей

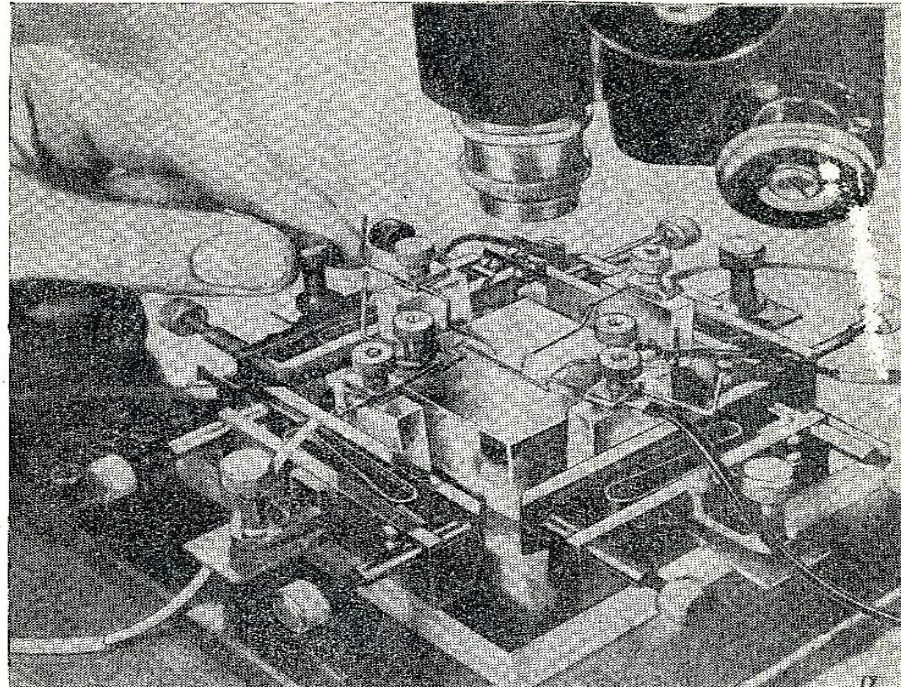
- 

На один носитель - 100 ловушек!

# Открытие транзисторного эффекта (1947 год) В.Шокли, Д.Бардин, В.Браттейн



# Биологический микроманипулятор на котором был открыт транзисторный эффект



# Открытие транзисторного эффекта (1947 год)

В. Шокли Л. Бардин В. Браттейн



# Запись Д.Бардина с описанием транзисторного эффекта (1947 год)

11 DATE Dec 18 1947  
 CASE NO 39829-7

These points on surface of this  
 unit are the  $\frac{1}{2}$ " apart

1 wire	$100 + 10^6 \text{ ohms}$
2 point	$100 + 2 \times 10^6 \text{ ohms}$

any little sensitivity

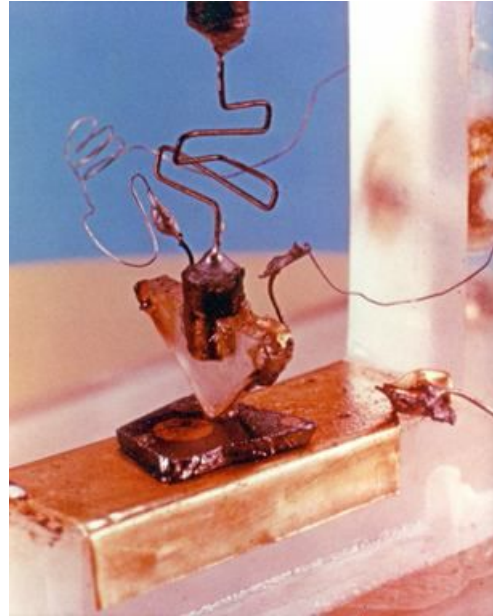
Dec 24 1947

Using the  $P_n$  surface (see  
 top of page 197 N.D. 18194 and  
 the gold contacts according to  
 B.N. 240026 the following circuit  
 was set up

with  $V_2 = 3 \text{ volts}$   $V_{10} = 90 \text{ volts}$   
 $I_b = 4 \times 10^{-6} \text{ amp}$   $I_c = 1.5 \times 10^{-6} \text{ amp}$   
 $I_e = 0.5 \times 10^{-6} \text{ amp}$

the above being D.C. values

# Первый точечный биполярный транзистор (1947 год)



# Празднование Нобелевской премии за изобретение транзистора( 1956 г )



# Роль наших ученых

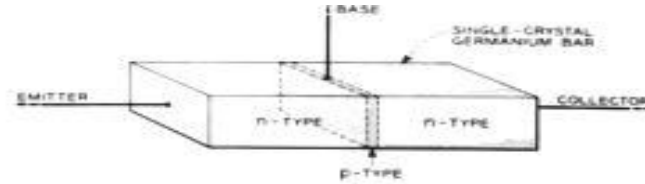
- В 1956 г. Дж. Бардин отметил в Нобелевской лекции, что они основывались на опыте Лилиенфельда и Поля, на теории Шоттки о проводимости в полупроводниках **и на разработках советских ученых А. Иоффе и И. Френкеля в Ленинграде и В. Давыдова в Киеве.**
- В 1949 г. московская студентка 22-летняя **Сусанна Мадоян** за время своей дипломной практики в институте электроники (закрытом, поэтому результаты работы не подлежали широкой публикации) под руководством А. В. Красилова **сделала работающий транзистор**



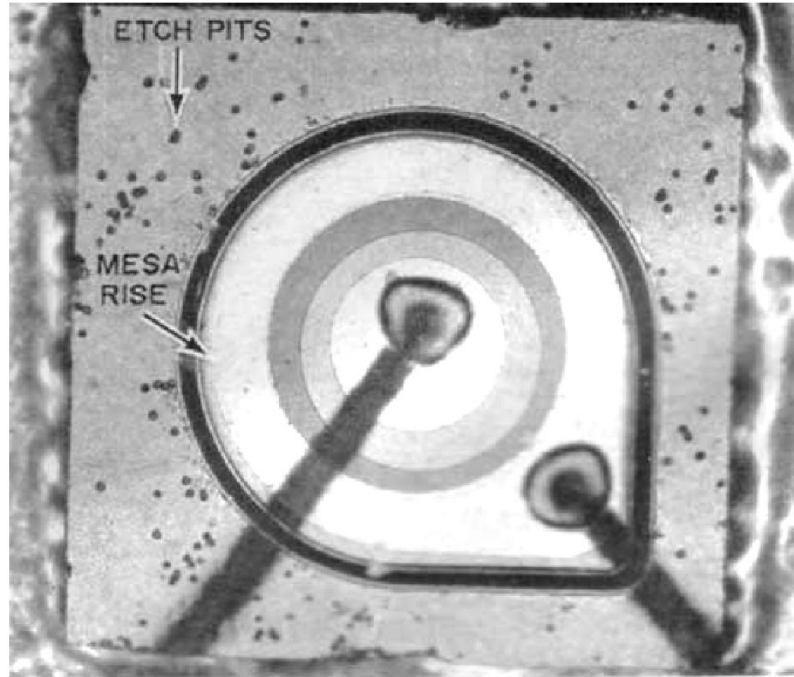
# Участок изготовления точечных транзисторов (1949 год)



# Первый плоскостной биполярный транзистор (1951 год)



# Первый плоскостной биполярный диффузионный транзистор (1958 год)



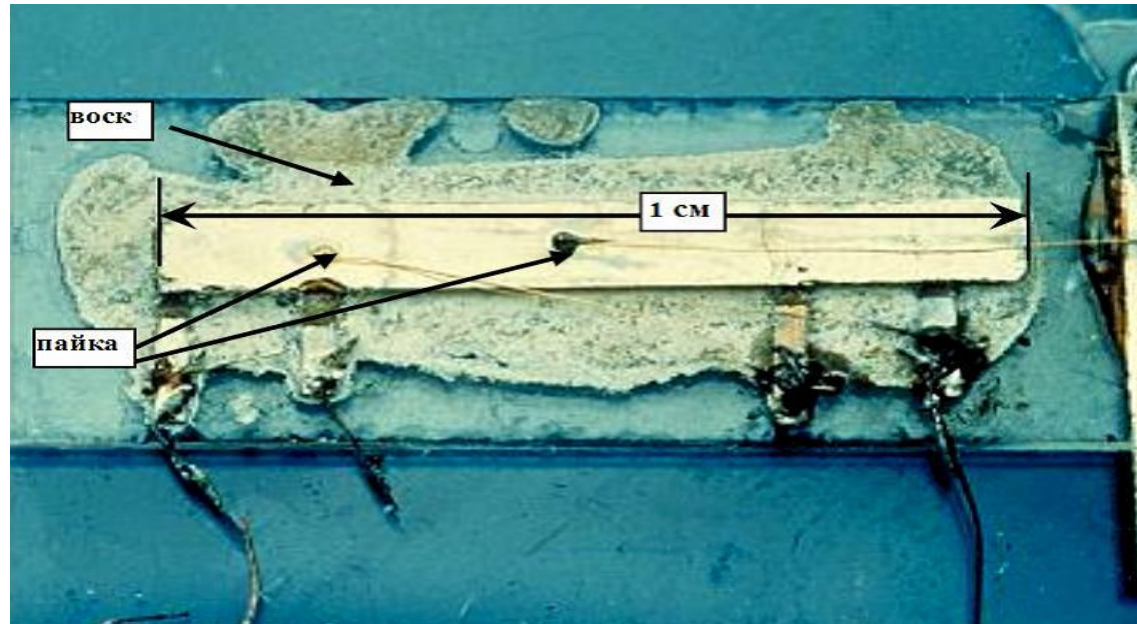
# Участок диффузии ( 1957 год )



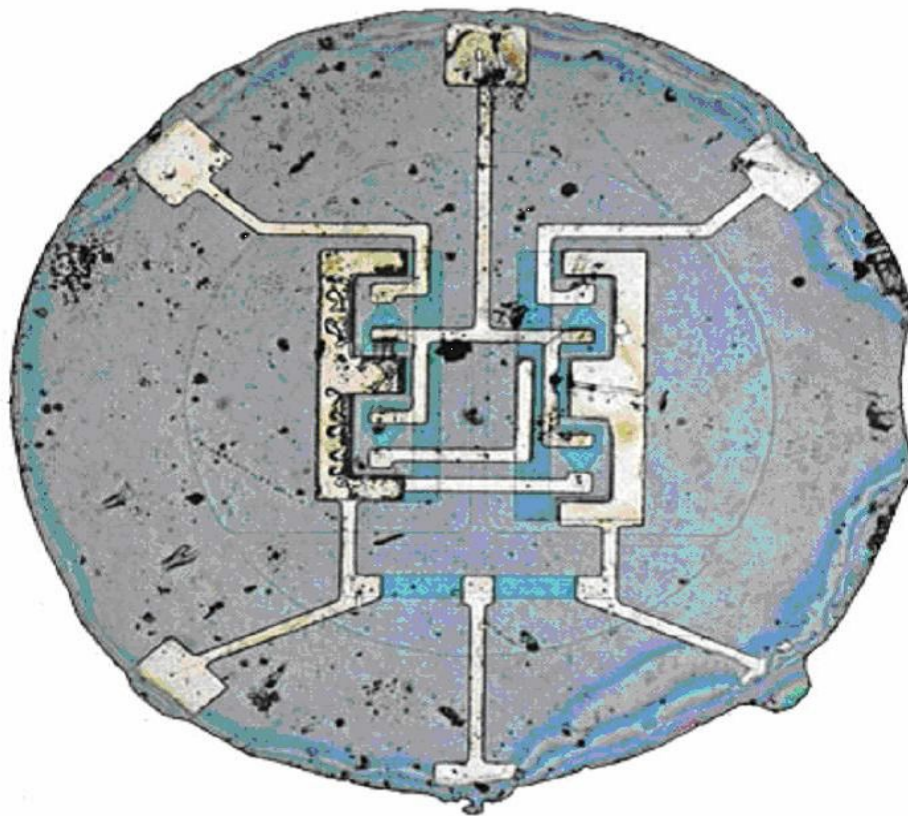
Изобретатели интегральной схемы –  
«чипа»  
Д.Килби и Р.Нойс



Первая интегральная схема на германии  
Джека Килби (1958 г)  
Нобелевская премия 2000 г



# Первая интегральная схема на кремнии Роберта Нойса (1959 г )

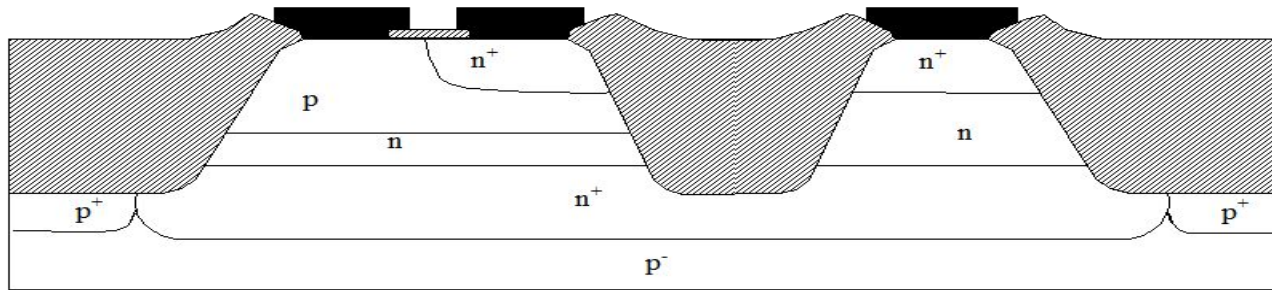


# Интегральная схема в корпусе

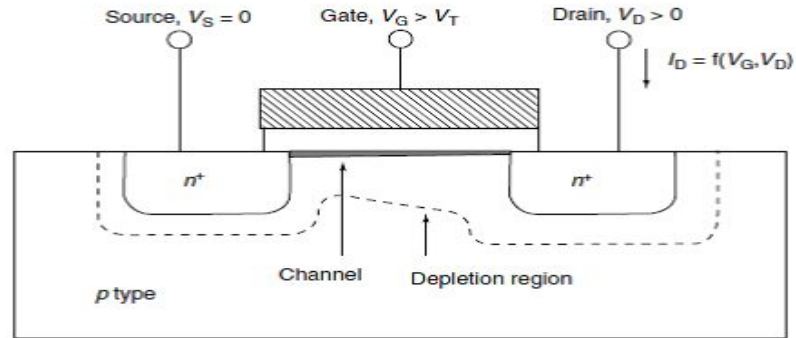




# Структура интегрального биполярного транзистора



# Структура МОП- транзистора

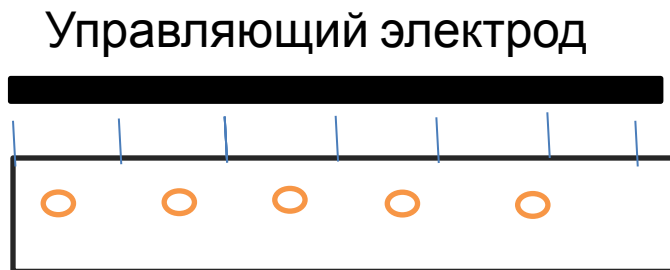


# Почему не работал МДП-транзистор

- 

- 

- Полупроводник



Ловушки –  $10^{14}\text{см}^{-2}$

Носители –  $10^{12}\text{см}^{-2}$

- Соотношение между поверхностными ловушками (оборванные связи) и количеством индуцированных полем носителей

- 

На один носитель - 100 ловушек!

# Разработчики метода пассивации поверхности кремния оксидом

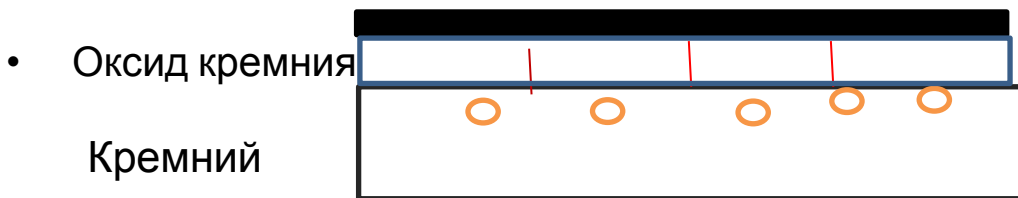
М.Аталла  
М.Кант



# Почему стал работать МОП-транзистор

- Эффект пассивации поверхности оксидом (1960-е гг. М. Аталла и Д. Кант )

Управляющий электрод



Ловушки –  $10^{11}\text{см}^{-2}$

Носители –  $10^{12}\text{см}^{-2}$

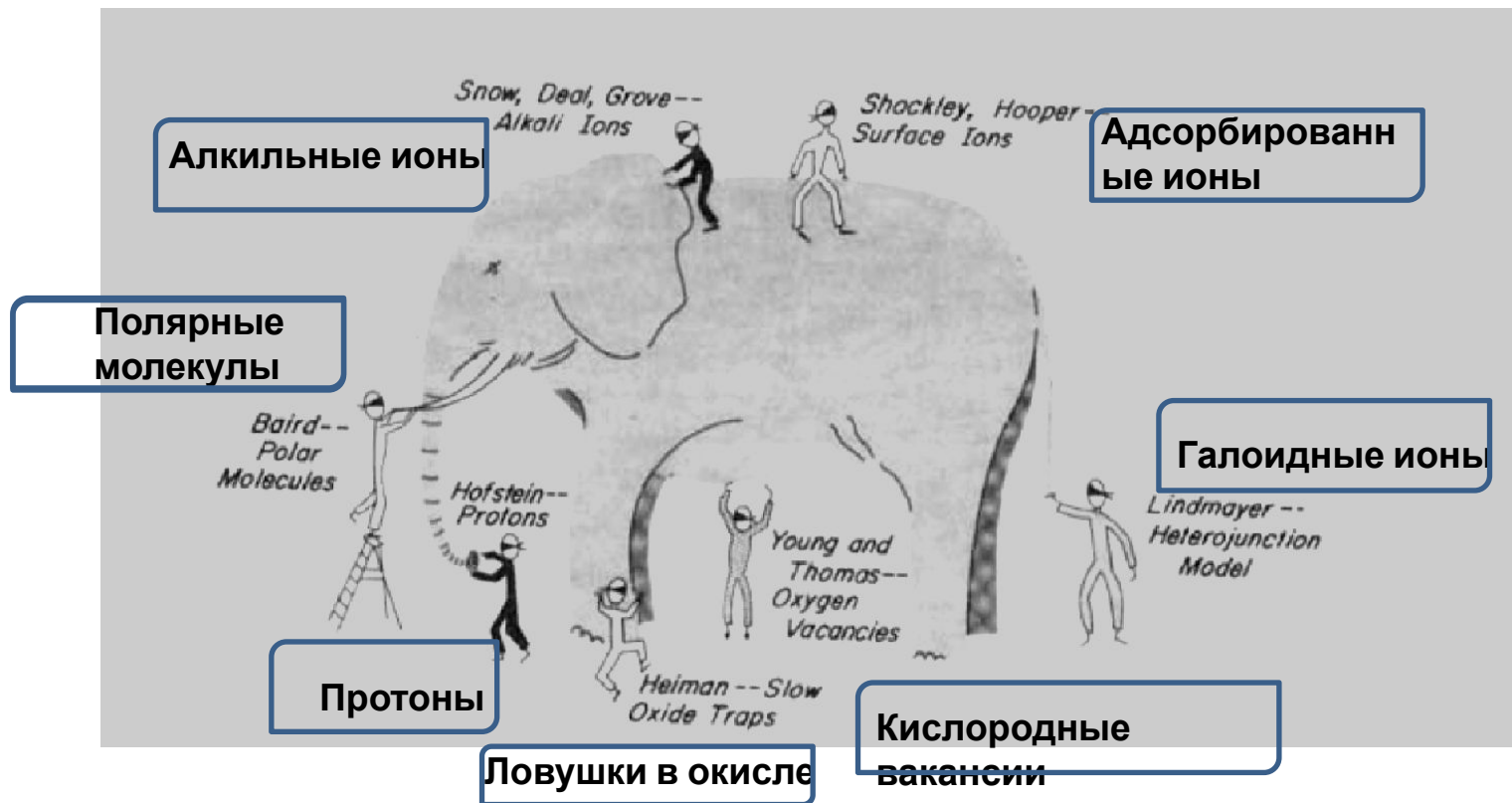
- Соотношение между поверхностными ловушками (оборванные связи) и количеством индуцированных полем носителей
- На одну ловушку - 10 носителей!

# Пороговое напряжение МОП-транзистора

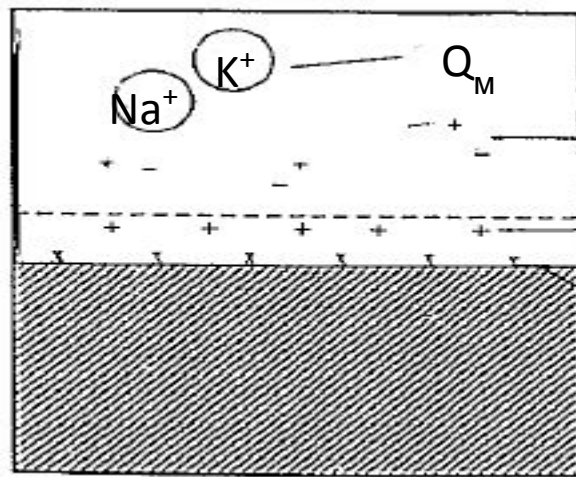


# Зарядовое состояние системы кремний-оксид

Слон и семеро слепцов Р.Донована



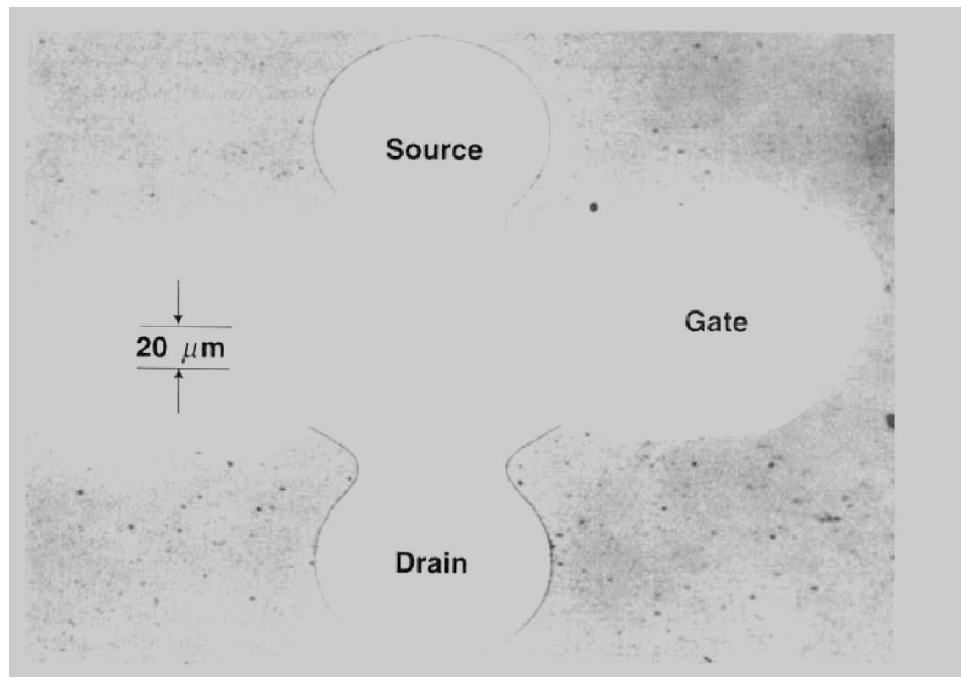
# Заряды в системе кремний-оксид кремния



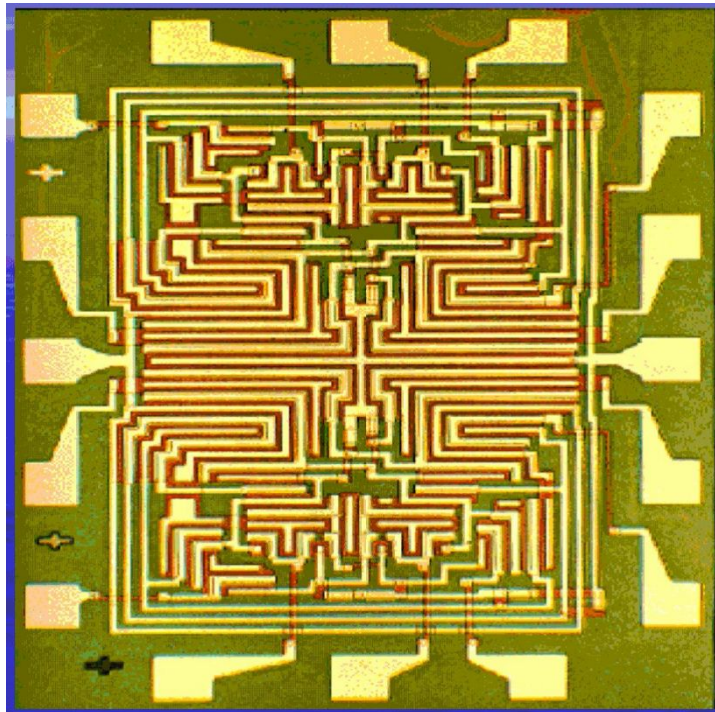
- $Q_M$  Мигрирующий заряд
- $Q_r$  Радиационный заряд
- $Q_p$  Постоянный заряд
- $Q_{пс}$  Заряд поверхностных состояний



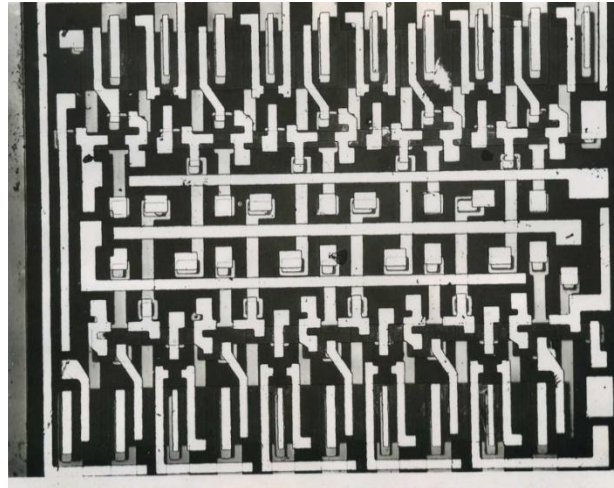
# Первый МОП- транзистор (1960 год)



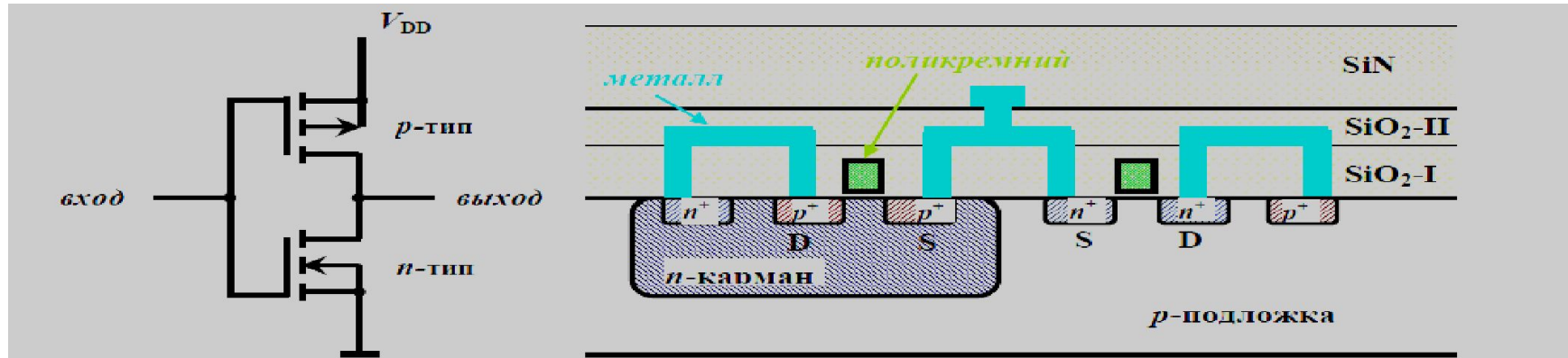
# Первая МОП-интегральная схема 64 транзистора (Bell Laboratories 1962 год)



# Первая отечественная МОП ИС более 60 транзисторов, (НИИМЭ. 1967 год)

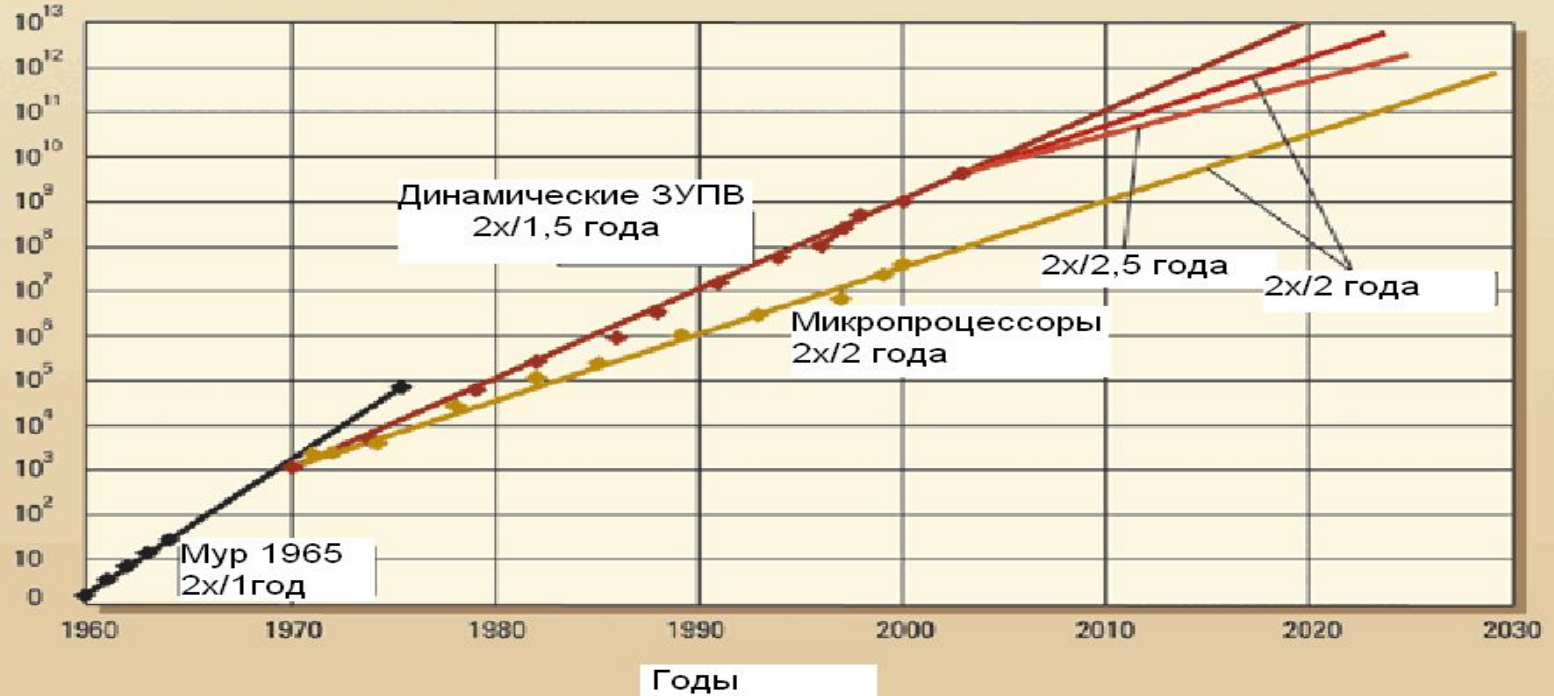


# КМОП - структура



# Закон Мура

Степень интеграции



# Влияние увеличения степени интеграции на параметры СБИС

1. Увеличение быстродействия ( производительности ) СБИС.
2. Повышение надежности СБИС.
3. Расширение функциональных возможностей СБИС.
4. Снижение стоимости СБИС.

Интегральная схема ПЗУ на всей пластине кремния диаметром 24 мм (НИИМЭ. 1969 год)



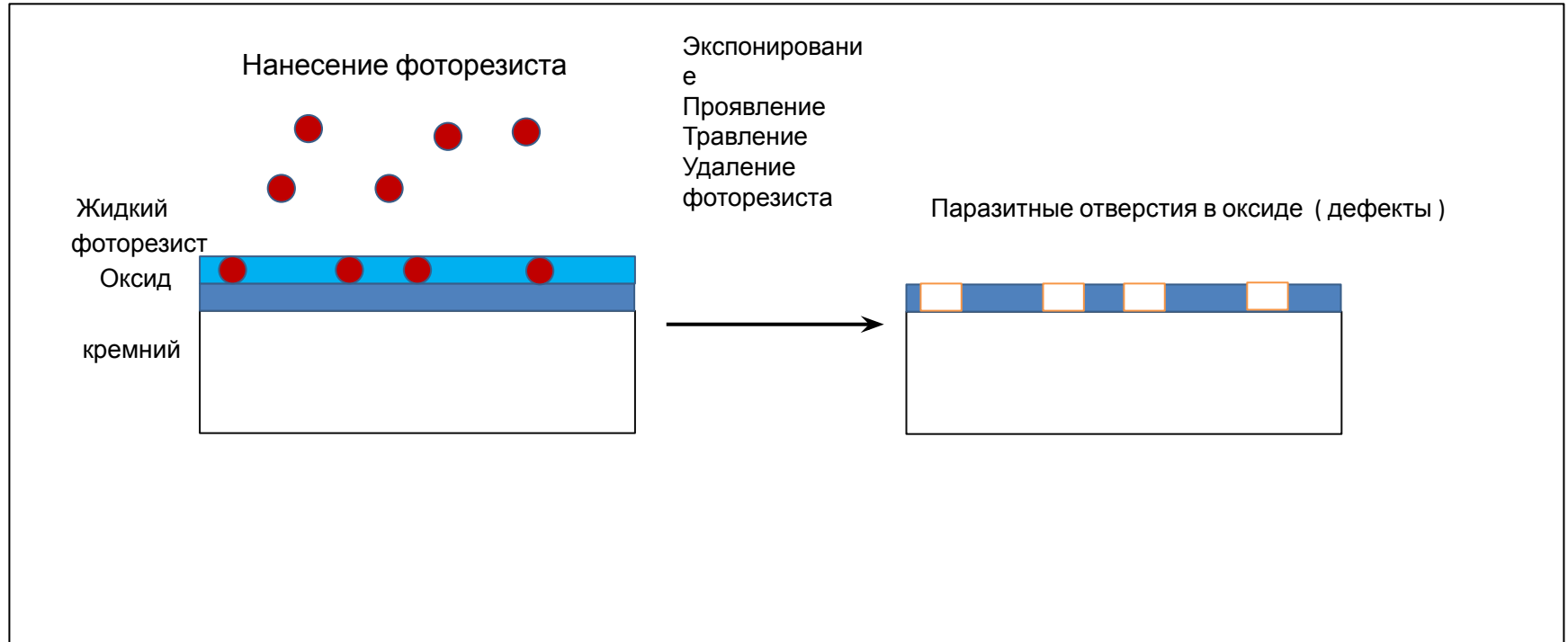
## Причины снижения выхода годных СБИС

Выход годных кристаллов на пластине кремния при изготовлении ИС снижается из-за возникновения бракованных кристаллов, что обусловлено различного рода дефектами:

- Повторяющимися (дефекты фотошаблонов)
- Параметрическими (связаны с несовершенством технологии)
- Случайными (возникающие в основном при фотолитографии) - 80%



# Образование случайных дефектов – паразитных отверстий в оксиде кремния





# Модели выхода годных

Для расчета выхода годных используют различные модели распределения случайных дефектов по пластине:

- Модель Пуассона ( случайное распределение )
- Модель Сидса ( экспоненциальное распределение )
- Модель Мерфи ( треугольное распределение )
- Отрицательная биномиальная модель ( гамма распределение )

# Биномиальное распределение

Если

$n$  – число дефектов (пылинок)

$N$  – число кристаллов

$P_k$  - вероятность содержания кристаллом  $k$  –дефектов

то

$$P_k = \frac{n!}{k!} (n - k)! \frac{1}{N^n} (N - 1)^{n-k}$$

# Распределение Пуассона

При больших значениях  $N$  и  $n$ , ( что и наблюдается на практике)

и если обозначить  $m = \frac{n}{N}$ ,

тогда

$$P_k = \frac{e^{-m} m^k}{k!}$$

# Выход годных

При  $k = 0$

$$Y_0 = P_0 = e^{-m}$$

# Зависимость выхода годных от площади кристалла и плотности дефектов.

Если площадь кристалла -  $A$ , плотность дефектов  $-D_0 = \frac{n}{NA}$ , то

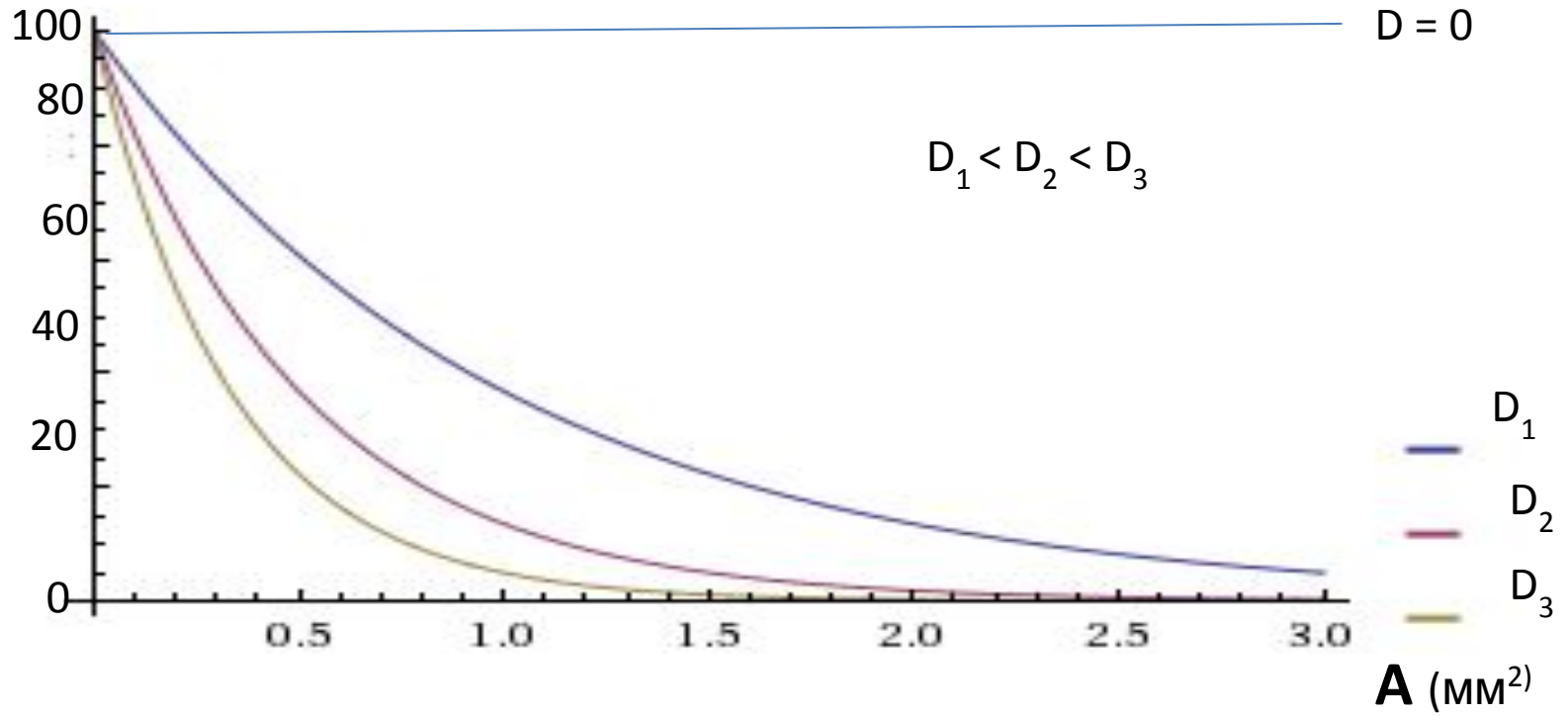
$$m = \frac{n}{N} = \frac{D_0 NA}{N} = D_0 A$$

и выход годных

$$Y = P_0 = \exp (- D_0 A )$$

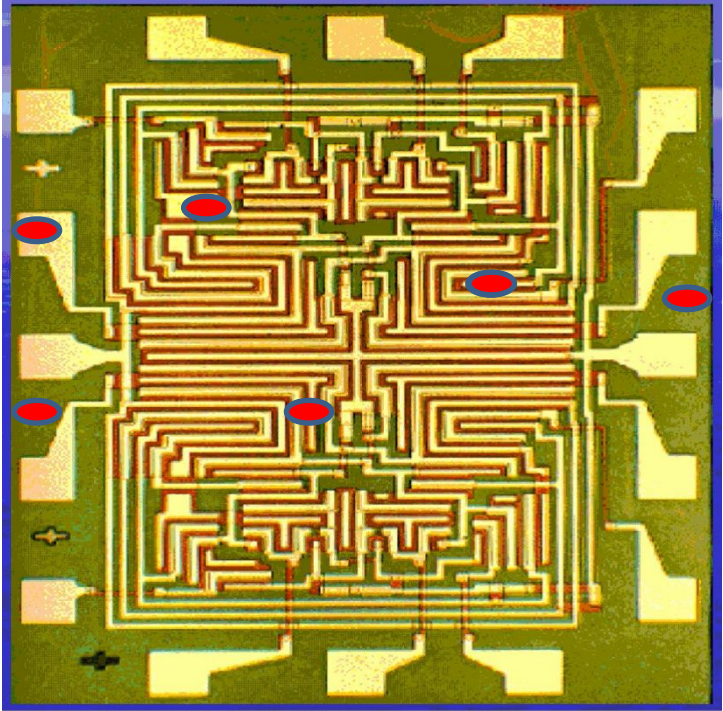
# Зависимость выхода годных от площади кристалла и дефектности

$Y(\%)$





# Поражающие и не поражающие дефекты

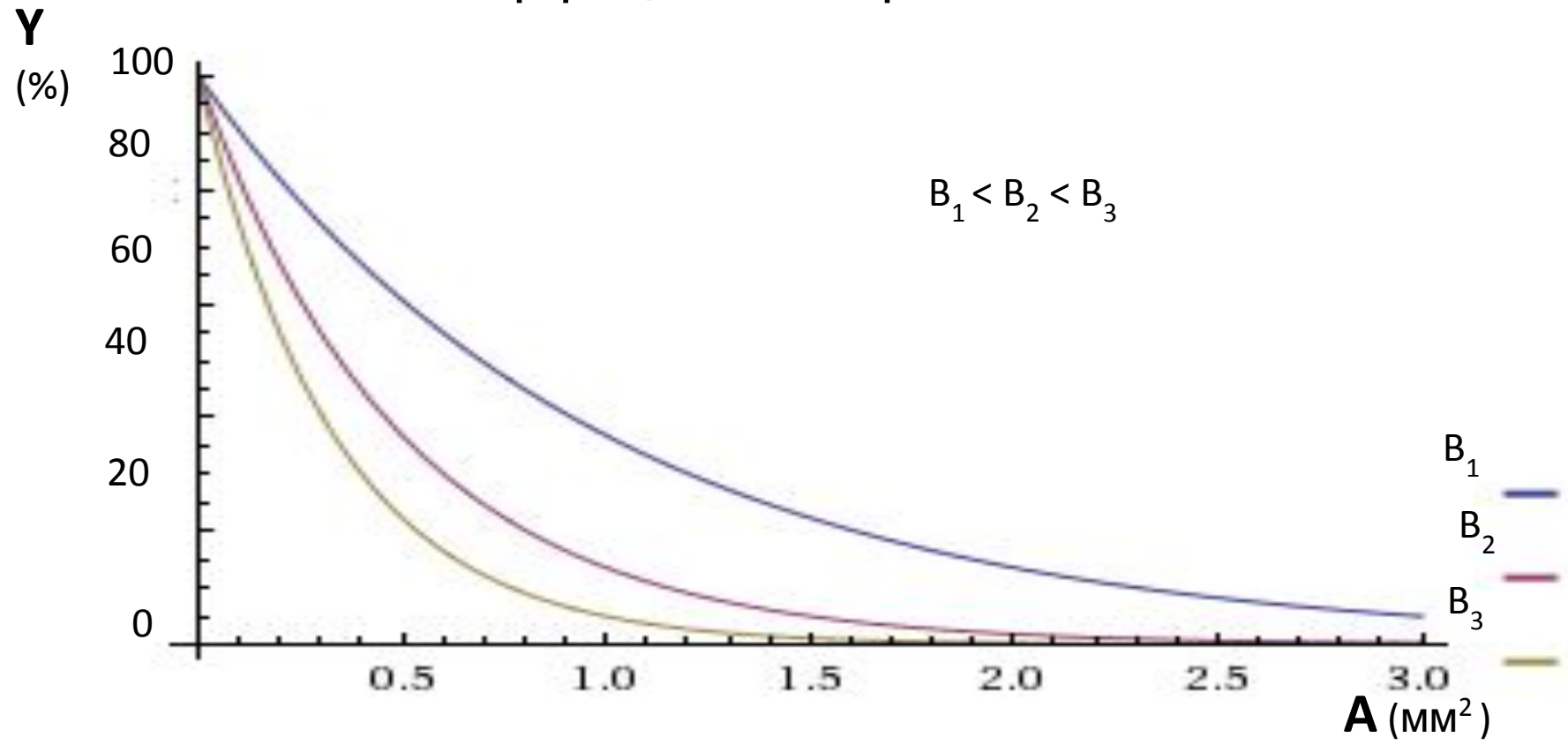


Коэффициент поражаемости

$$B = \frac{A_n}{A}$$

$$Y = \exp(-BD_0 A)$$

# Зависимость выхода годных от площади кристалла и коэффициента поражаемости



# Выход годных

Учет коэффициента поражаемости при определении выхода годных.

$$Y = \exp(-BD_0A)$$

# Выход годных

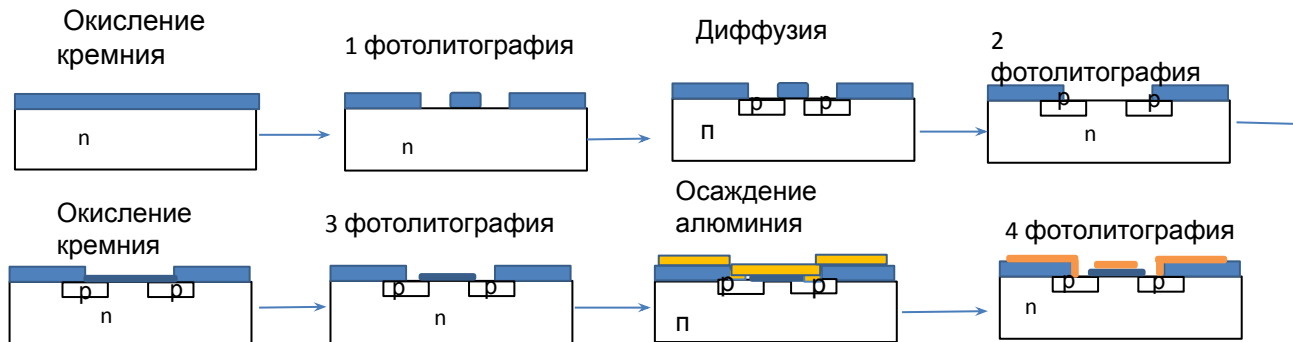
Учет коэффициента поражаемости при определении выхода годных.

$$Y = \exp(-BD_0A)$$

Для увеличения выхода годных наиболее целесообразно уменьшать коэффициент поражаемости  $B$

# Пример расчета коэффициента поражаемости. Технологический маршрут

p



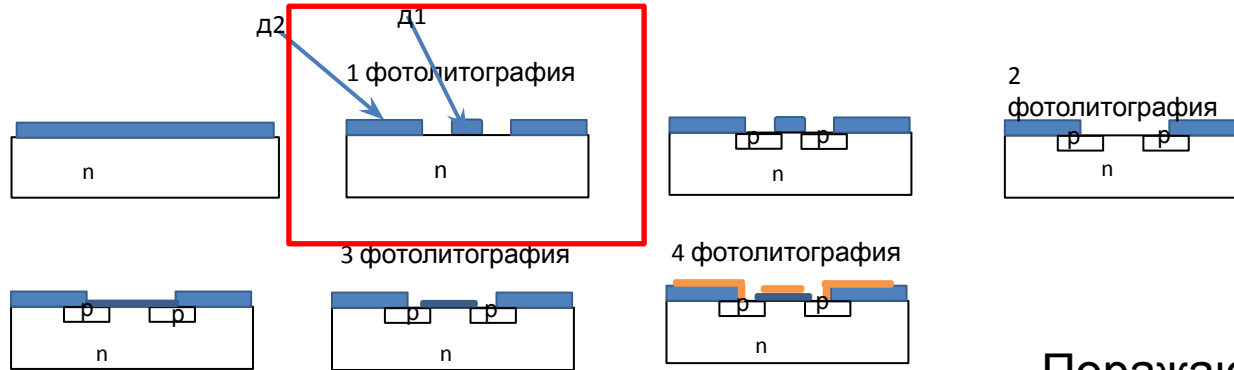
# Параметры МОП ИС

Для упрощения анализа и расчетов примем следующие модельные конструктивные параметры *p*-канальной МОП ИС:

- Площадь кристалла - 1 мм<sup>2</sup>
- Степень интеграции ( количество транзисторов ) – 100
- Длина канала МОП транзистора – 10 мкм
- Ширина канала МОП транзистора – 100 мкм
- Толщина изолирующего окисла - 1 мкм
- Толщина подзатворного окисла - 0,1 мкм
- Величина перекрытия электрод затвора – исток\сток – 3 мкм

# Технологический маршрут

Первая фотолитография – формирование окон исток-сток



Поражающий эффект

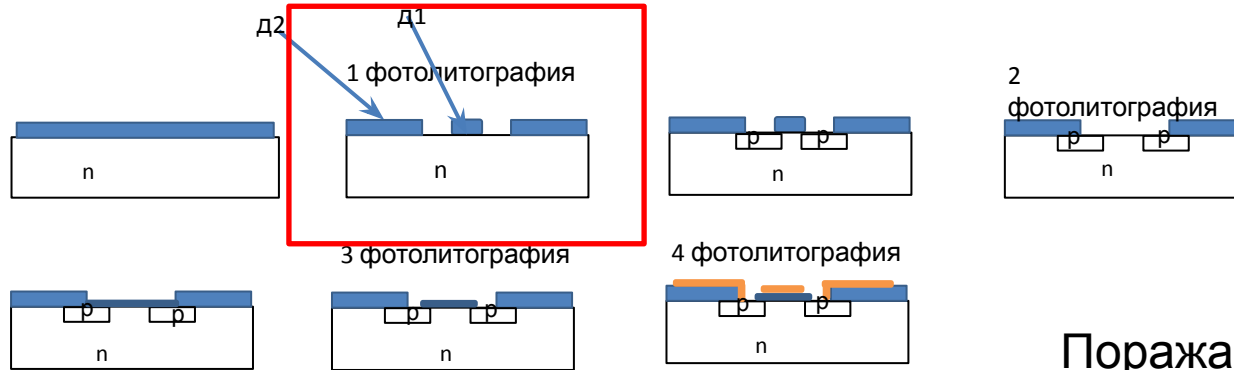
Д1 –

Д2 –



# Технологический маршрут

Первая фотолитография – формирование окон исток-сток



Поражающий эффект  
Д1 – да  
Д2 – нет

# Расчет коэффициента поражаемости для первой литографии

Поражаемая площадь кристалла для первой фотолитографии будет определяться площадью каналов всех транзисторов ИС:

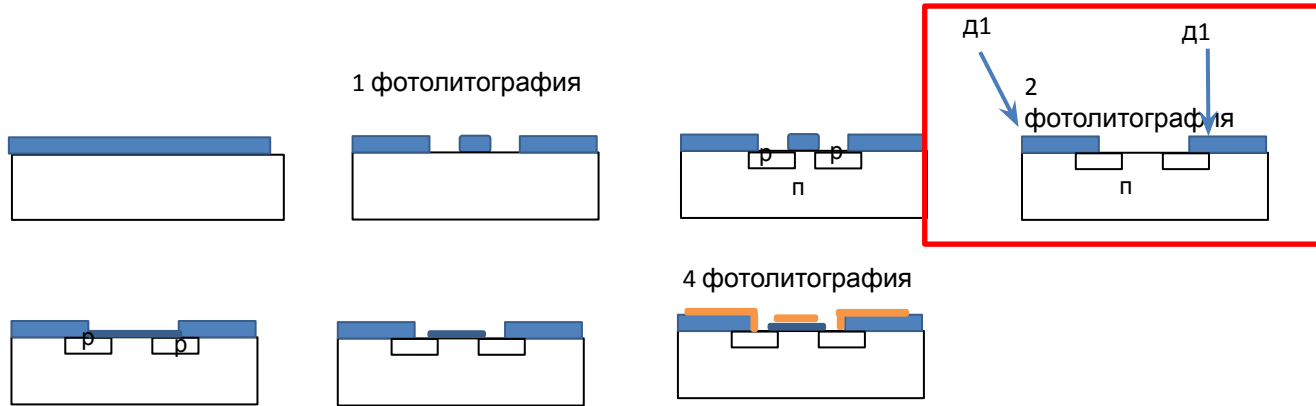
$$A_n = 10 \text{ мкм} \times 100 \text{ мкм} \times 100 = 0,1 \text{ мм}^2.$$

Коэффициент поражаемости на этом этапе будет равен:

$$B_1 = \frac{A_n}{A} = 0,1 \text{ мм}^2 / 1 \text{ мм}^2 = 0,1.$$

# Технологический маршрут

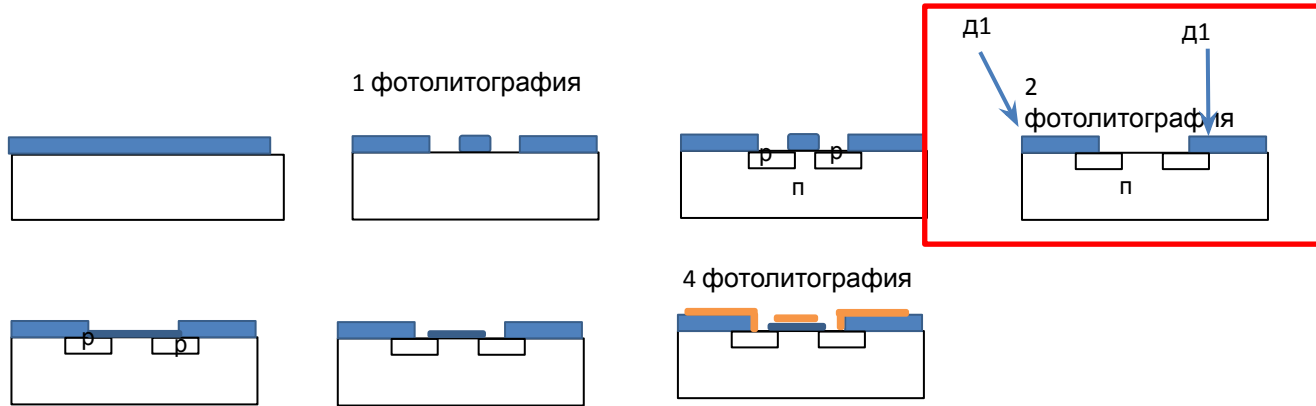
Вторая фотолитография – вскрытие окна под тонкий окисел



Поражающий эффект  
Д1 -

# Технологический маршрут

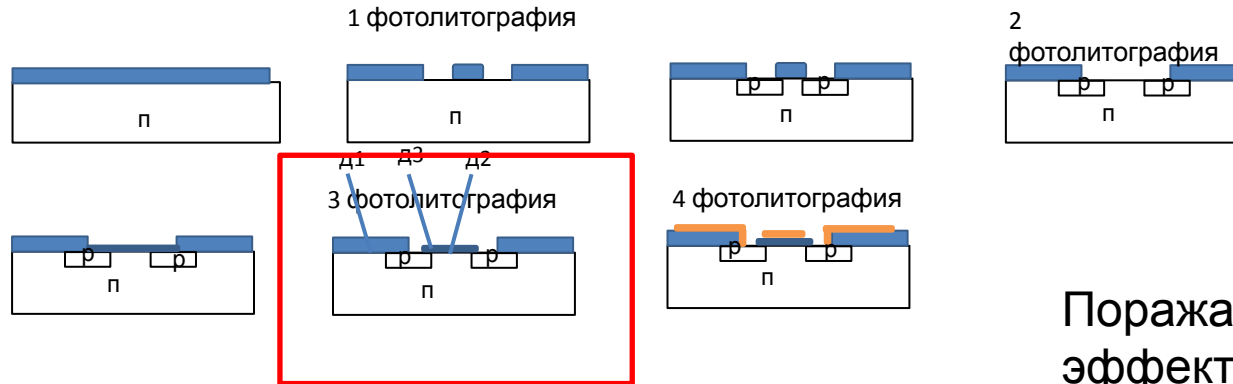
Вторая фотолитография – вскрытие окна под тонкий окисел



Поражающий  
эффект  
Д1 - т

# Технологический маршрут

Третья фотолитография – формирование контактных окон исток/сток



Поражающий эффект

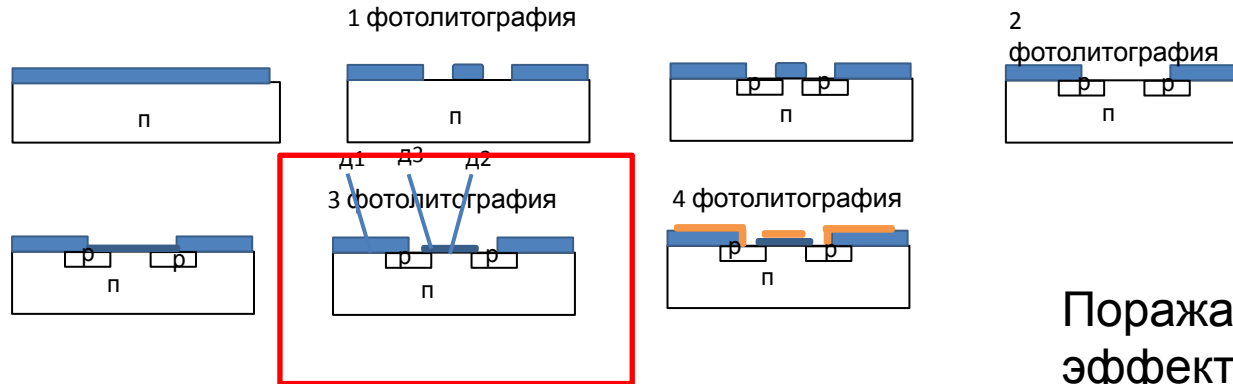
Д1 –

Д2 –

Д3 –

# Технологический маршрут

Третья фотолитография – формирование контактных окон исток/сток



Поражающий эффект  
Д1 – нет  
Д2 – да  
Д3 – да

# Расчет коэффициента поражаемости для третьей литографии

Таким образом, поражаемая площадь будет равна:

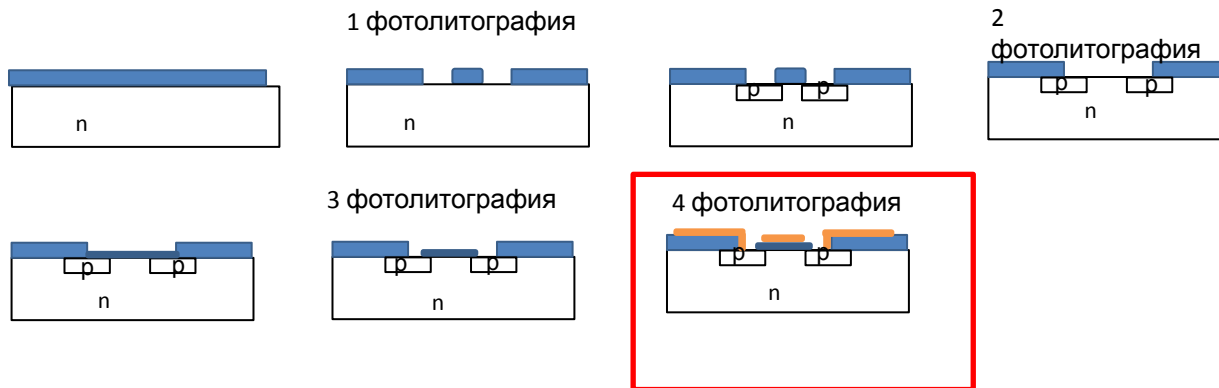
$$A_{\text{п}} = ( 10 \text{ мкм} + 6 \text{ мкм} ) \times 100 \text{ мкм} \times 100 = 0,16 \text{ мм}^2.$$

$$B_3 = 0,16 \text{ мм}^2 / 1 \text{ мм}^2 = 0,16.$$

# Технологический маршрут

## Четвертая фотолитография – формирование алюминиевой разводки

p





## Выход годных для МОП ИС

Таким образом, суммарный коэффициент поражаемости всего маршрута будет равен  $0,1 + 0,16 = 0,26$  и выход годных для данной схемы может быть определен по формуле:

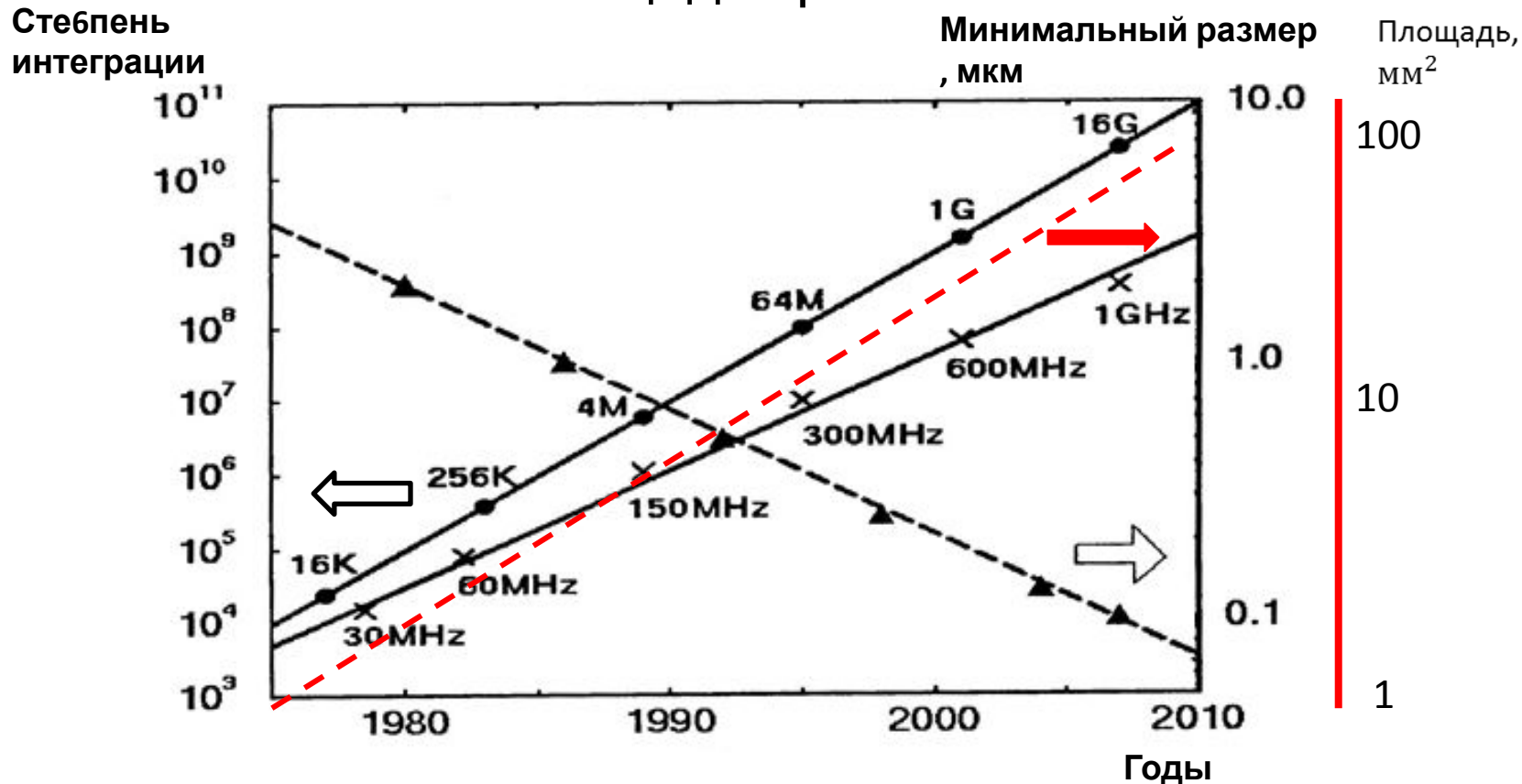
$$Y = \exp(-0,26D_0)$$

## Закон сохранения выхода годных

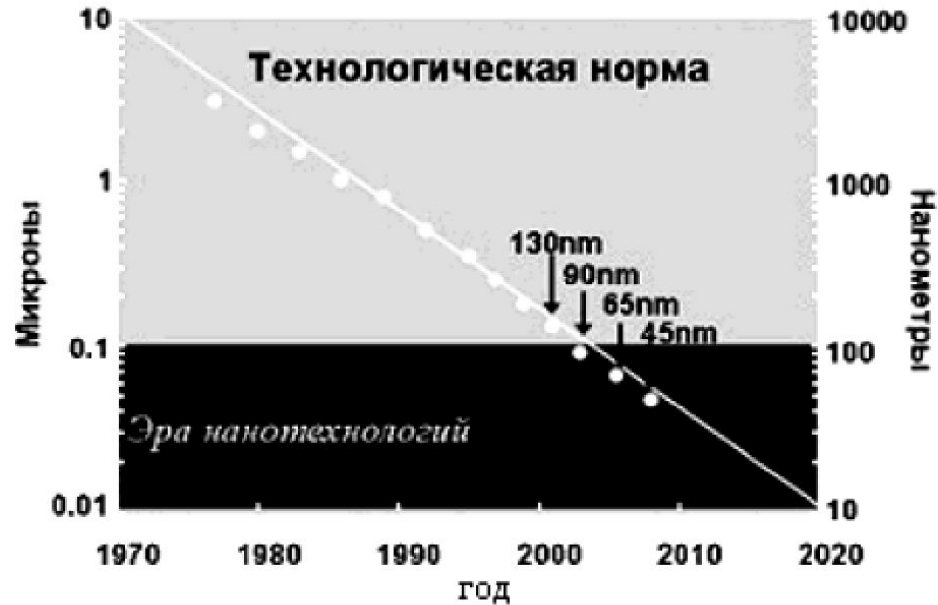
$$A_n = BA = A_{\exists}M$$

$$Y = \exp(-BD_0A) = \exp(-D_0 \underset{\downarrow}{A} \overset{\uparrow}{\exists} M)$$

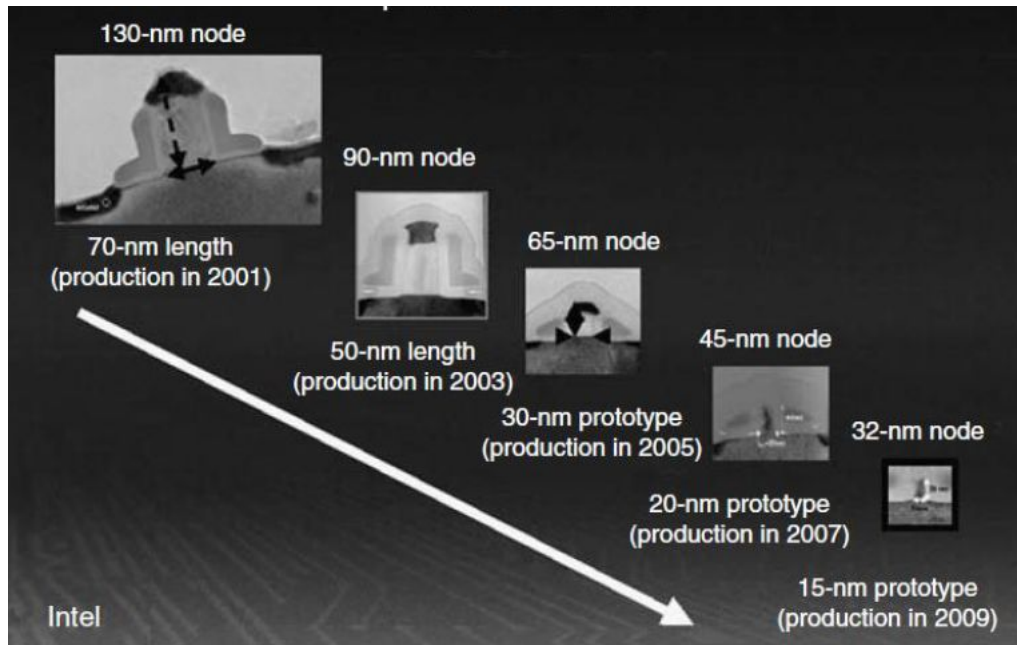
# Изменение степени интеграции, минимального размера и площади кристалла



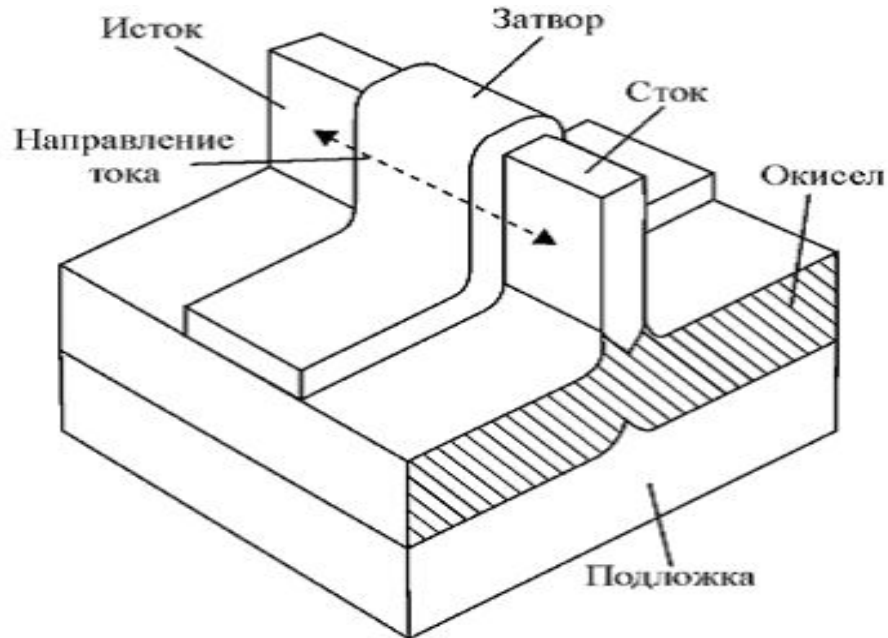
# Эволюция технологической нормы



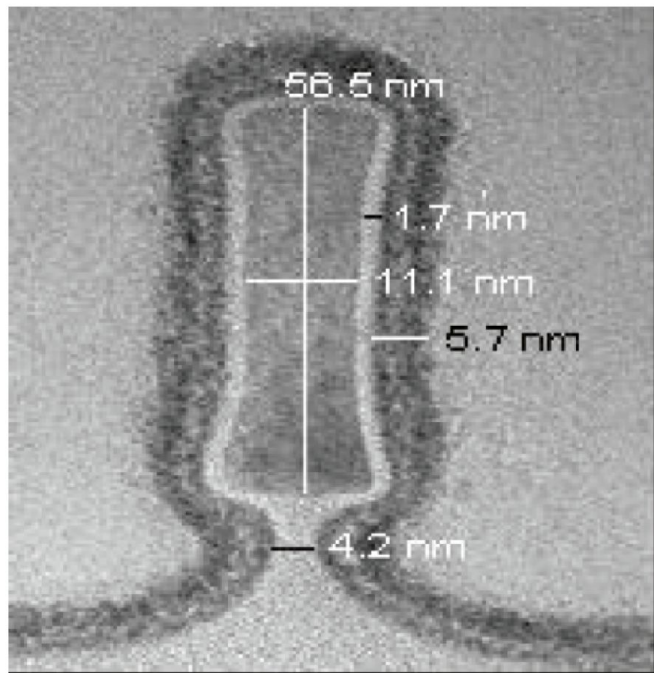
# Технологические поколения



# 3D МОП- транзистор с двумя затворами



# РЭМ-фотография 3D МОП-транзистора с двумя затворами



Толщина подзатворного оксида – 1,7 нм  
Толщина электрода затвора – 5,7 нм  
Толщина «тела» транзистора – 11,1 нм  
**Толщина в сечении всего транзистора  
26,4 нм!**

# Зависимость выхода годных $Y$ от минимального размера $L_m$

