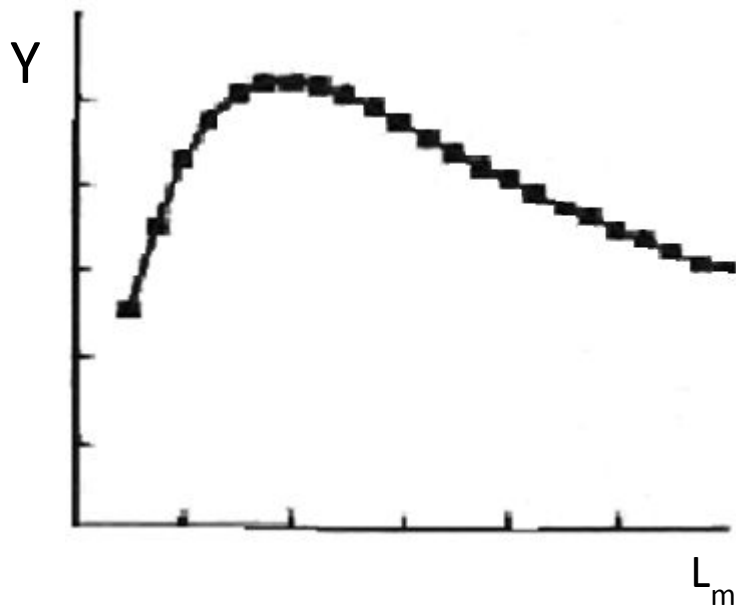


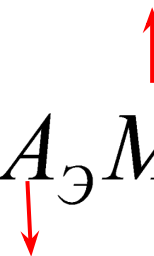
## Лекция 2

# Ограничения уменьшения размеров МОП транзистора

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



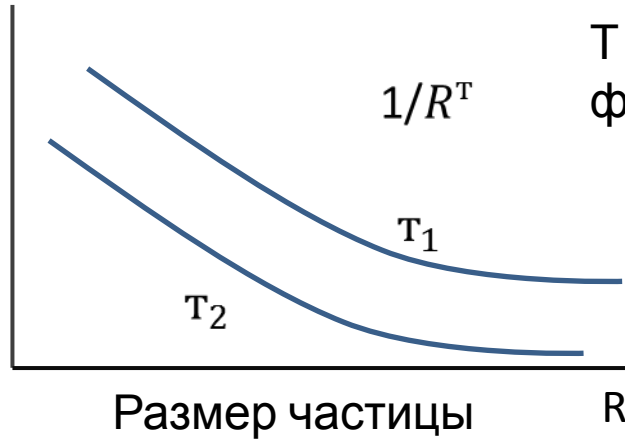
## Закон сохранения выхода годных

$$Y = \exp(-BD_0 A) = \exp(-D_0 A_{\exists} M)$$


# 1. Ограничения, связанные с дисперсией размеров пыли

Зависимость числа осажденных пылинок от их размера

Доля<sup>T</sup>  
в общем  
объеме  
воздуха

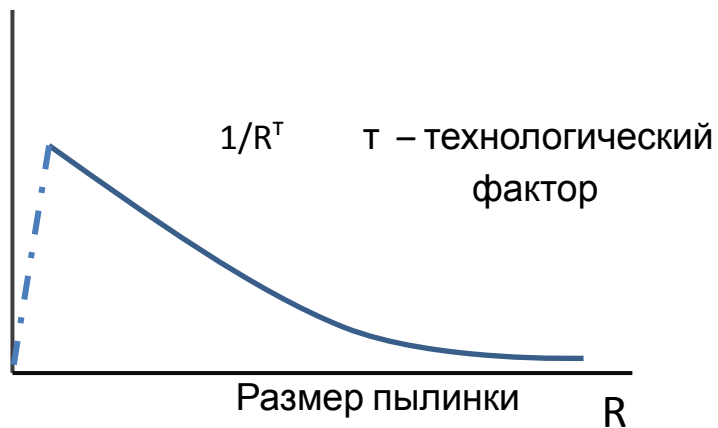


$T$  – технологический  
фактор

$$T_1 < T_2$$

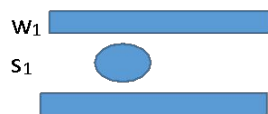
# Зависимость числа осажденных пылинок от их размера

Доля  
в общем  
количестве



# Влияние размера дефекта и элемента на отказ ИС

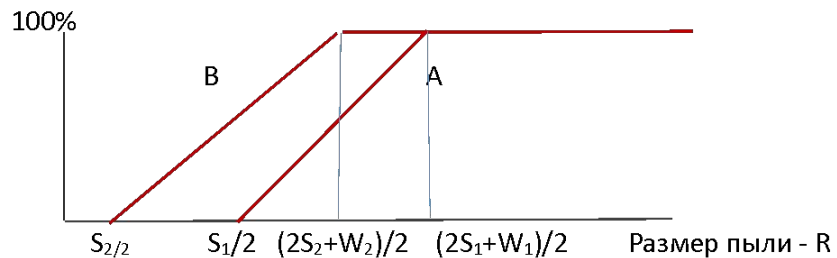
A



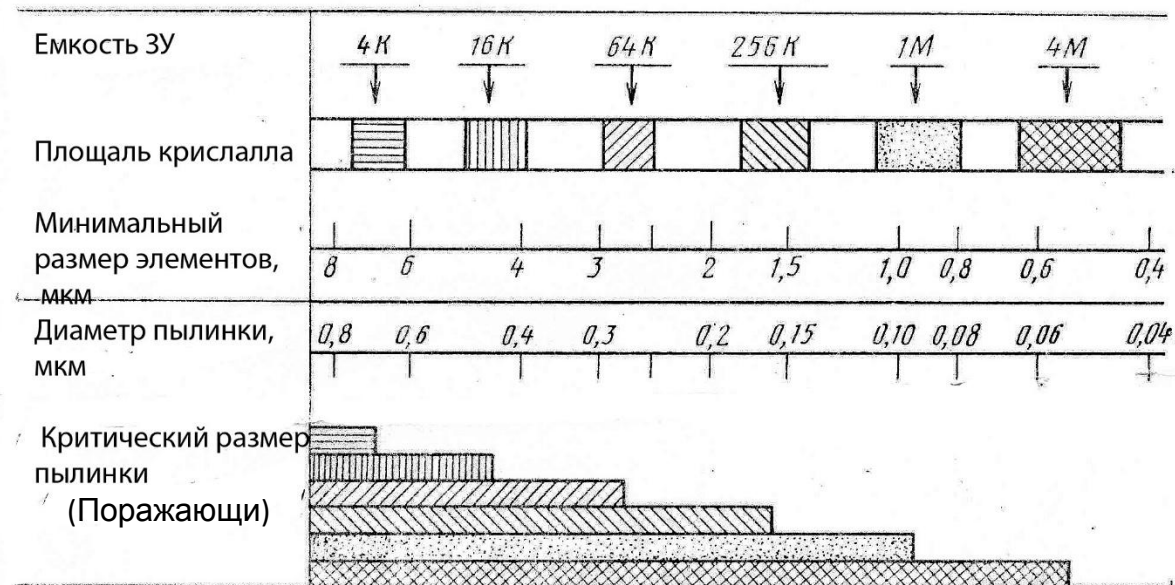
B



Вероятность отказа



# Влияние размеров дефектов на степень интеграции ИС



Учет влияния дисперсии размеров дефектов на выход годных ИС.

$$Y = \exp(-A_{\text{э}} M D_0).$$

Если  $D_0 = D / l^{\tau}$  где  $D$  – constant,  $l$  – минимальный топологический размер.  $\tau$  – технологический фактор,

и  $A_{\text{э}} = l^2 N$ , где  $N$  – число квадратов со стороной  $l$ , определяющих площадь элемента и тогда

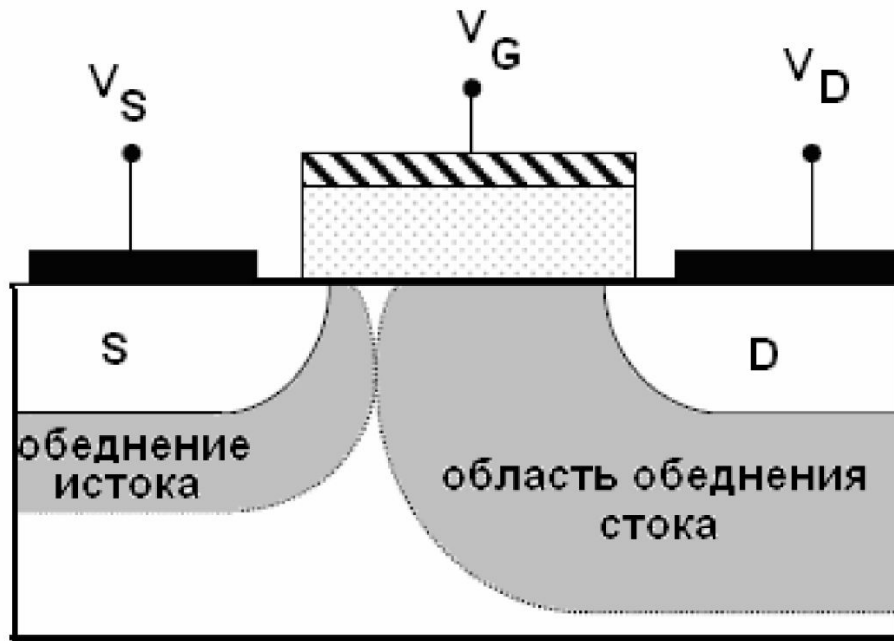
$$Y = \exp(-l^2 N M D / l^{\tau}) = \exp(-N M D / l^{\tau-2})$$

**Рациональный путь повышения  $M$  – увеличение значения технологического фактора -  $\tau$ !**

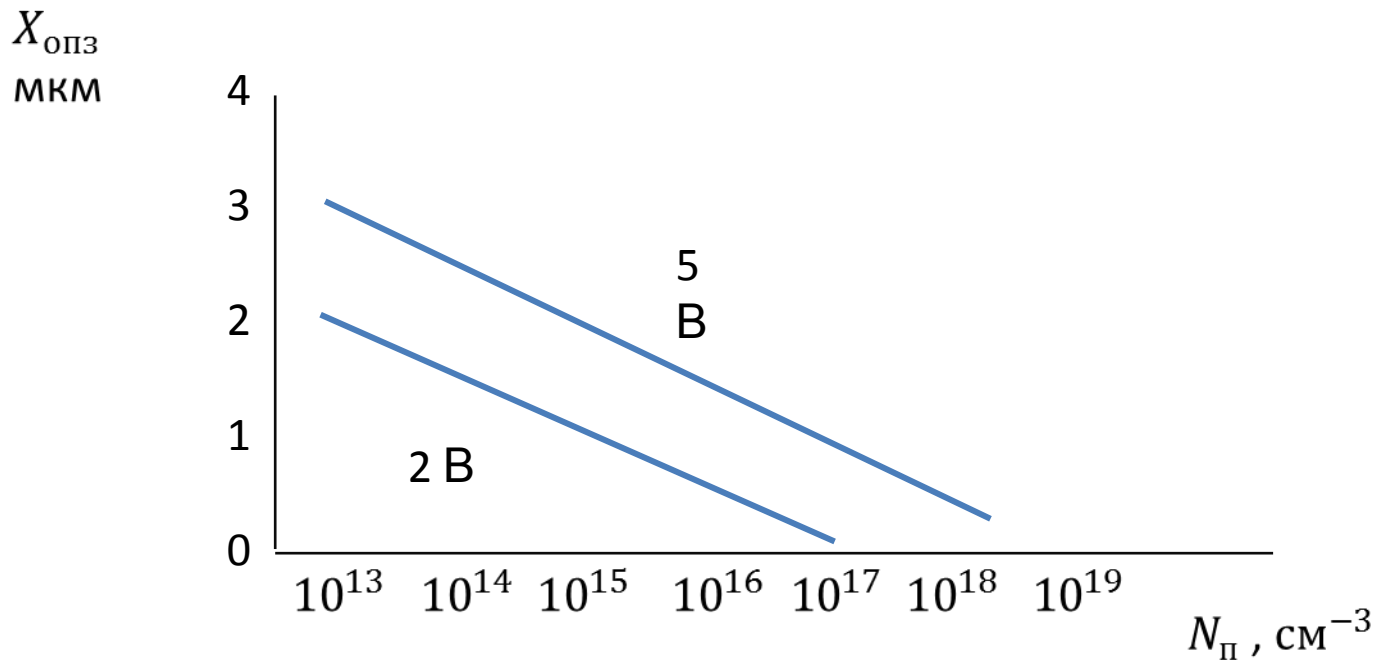


## **2. Приборные (параметрические ) ограничения**

Ограничения, связанные со смыканием  
областей ОПЗ истока и стока при уменьшении  
длины канала



# Зависимость ширины ОПЗ от концентрации примеси и напряжения смещения

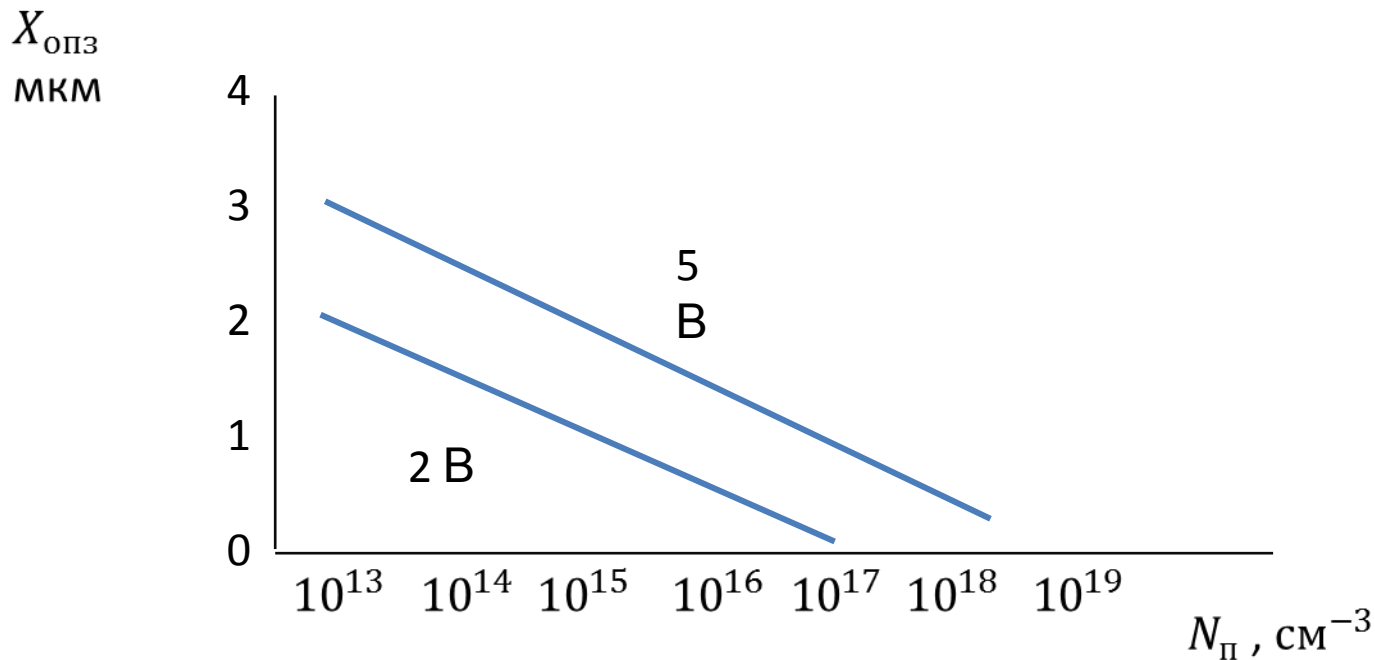


# Логика закона масштабирования



Положительное	М увеличивается			
Если, то	$L_k$ уменьшить	?		
отрицательное	КЗ ОПЗ возникает			

# Зависимость ширины ОПЗ от концентрации примеси и напряжения смещения



# Пороговое напряжение МОП-транзистора

- - Выравнивание зон
  - Обеднение
  - Инверсия
- $$U_{\Pi} = \varphi_{МП} + Q_{д/с_д} + Q_{\Pi/с_д} + 2\varphi_F$$

$Q_{\Pi} \sim N_{\Pi}$

# Логика закона масштабирования



Положительное	М увеличивается	КЗ ОПЗ устраняется		
Если, то	$L_k$ уменьшить	$N_n$ увеличить	?	
отрицательное	КЗ ОПЗ возникает	$U_n$ возрастает		

# Пороговое напряжение МОП-транзистора

- 
- $$U_{\Pi} = \varphi_{МП} \quad + \quad Q_{д/с_{д}} \quad + \quad \boxed{Q_{\Pi/с_{д}}} \quad + \quad 2\varphi_F$$

$C_{д} \sim 1/X_{д}$



# Логика закона масштабирования



Положительное	M увеличивается	КЗ ОПЗ устраняется	$U_n$ уменьшается	
Если, то	$L_k$ уменьшить	$N_n$ увеличить	$X_d$ уменьшить	?
отрицательное	КЗ ОПЗ возникает	$U_n$ возрастает	$U_{\text{проб}}$ уменьшается	

# Логика закона масштабирования

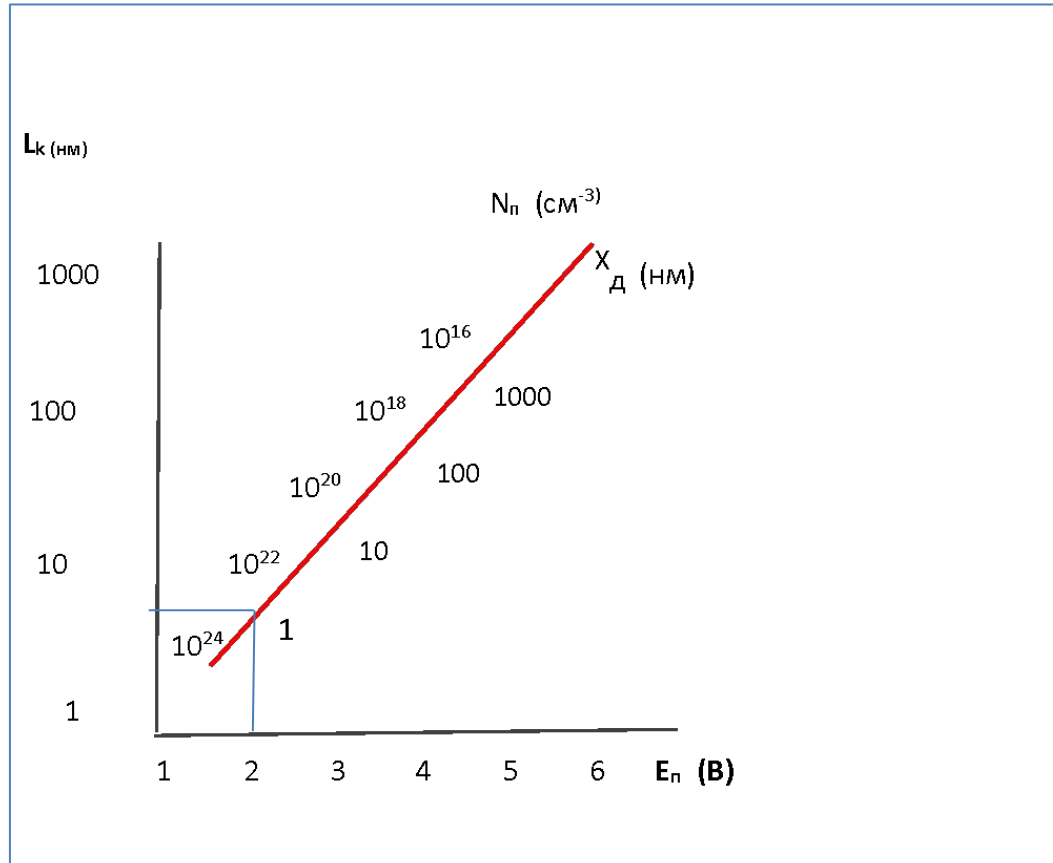


Положительное	М увеличивается	КЗ ОПЗ устраняется	U <sub>п</sub> уменьшается	
Если, то	L <sub>к</sub> уменьшить	N <sub>п</sub> увеличить	X <sub>д</sub> уменьшить	E <sub>п</sub> уменьшить
отрицательное	КЗ ОПЗ возникает	U <sub>п</sub> возрастает	U <sub>проб</sub> уменьшается	

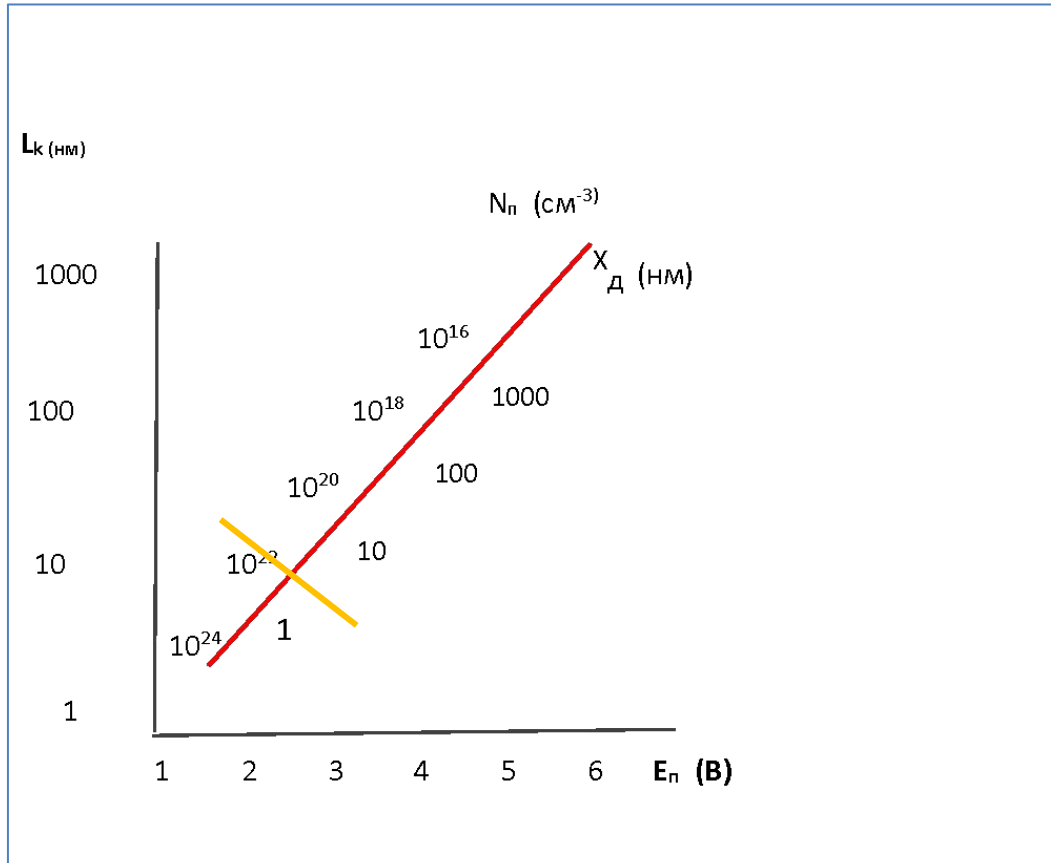
# Влияние масштабирования на параметры ИС

- 
- К - коэффициент масштабирования, E - constant
- 
- $L_k, W_k, X_{ок}, W_{мс}, N_{pn}$   $1/k$
- $N_p$   $k$
- $U_{ст}$   $1/k$
- E  $1 !$
- $I_{ст}$   $1/k$  ( на один транзистор)
- $t_3$   $1/k !$
- P  $1/k^2$  (на один транзистор) !
- $Pt_3$   $1/k^3$  ( энергия затрачиваемая на операцию с 1 битом )
- $R_{мс}$  K ( при уменьшении лишь ширины дорожки межсоединений)
- $C_{мс}$   $1/k$
- $T_{3мс} (R_M C_M)$   $1 !$

# График закона масштабирования



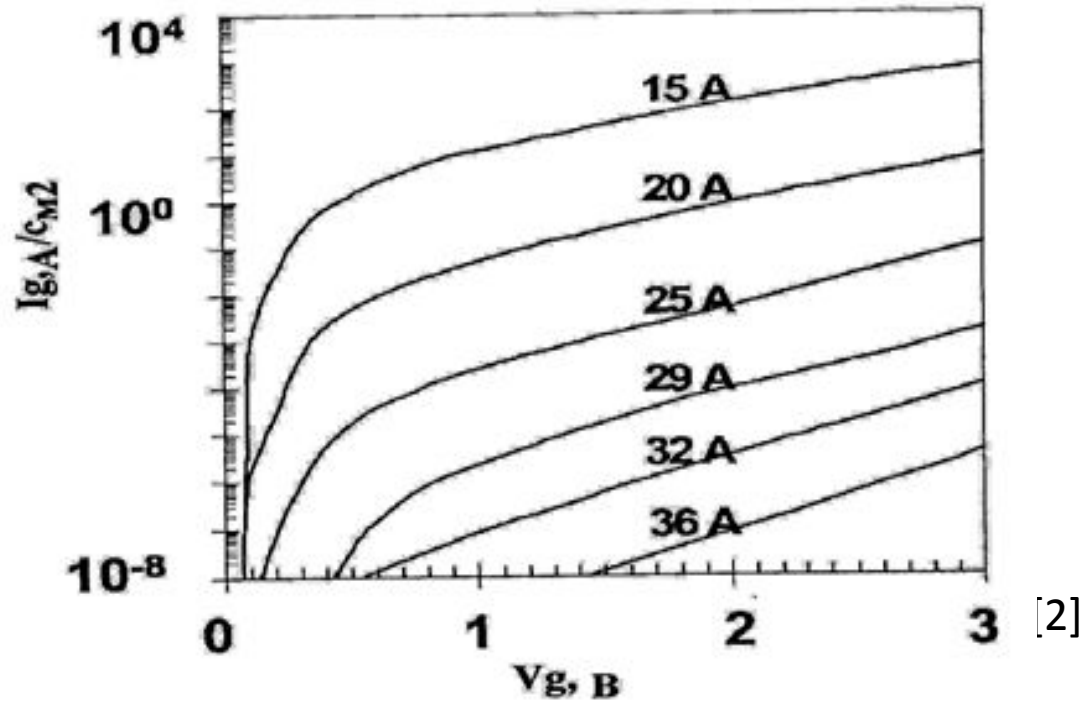
# Ограничение графика закона масштабирования



### **3. Физические ограничения**

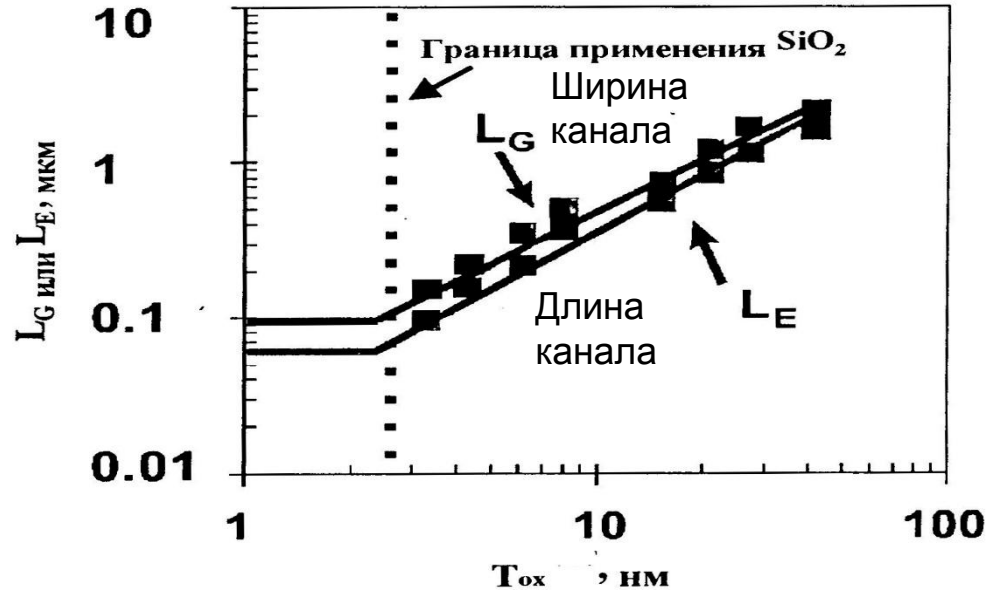
Подзатворный диэлектрик – основная проблема уменьшения размеров МОП транзистора

# Зависимость величины туннельного тока через диэлектрик от напряжения на затворе



[2]

# Зависимость ширины и длины канала от толщины подзатворного оксида кремния



(2)



# Изменение толщины подзатворного диэлектрика



[2]

# Использование альтернативных диэлектриков

Эффективная толщина подзатворного диэлектрика

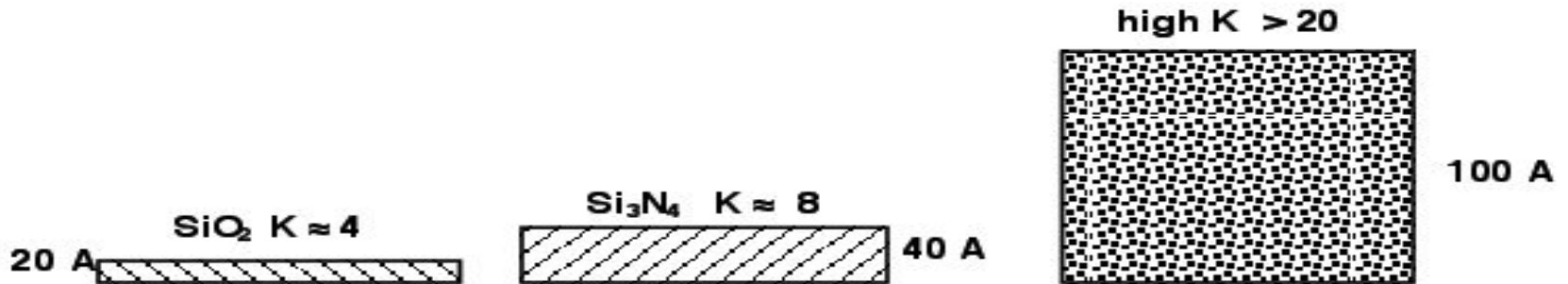
$$T_{\text{э}} = T_{\text{д}} \kappa_{\text{ок}} / \kappa_{\text{д}}$$

$T_{\text{э}}$  - эффективная толщина подзатворного диэлектрика

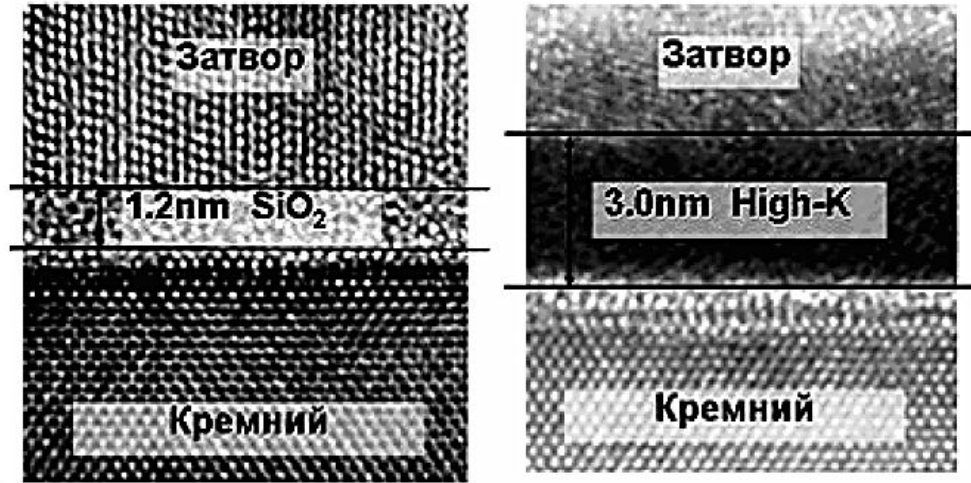
$T_{\text{д}}$  – толщина альтернативного диэлектрика

$\kappa_{\text{д}}$  и  $\kappa_{\text{ок}}$  - коэффициенты диэлектрической проницаемости альтернативного диэлектрика и оксида кремния

# Влияние диэлектрической проницаемости альтернативного диэлектрика на физическую толщину подзатворного диэлектрика

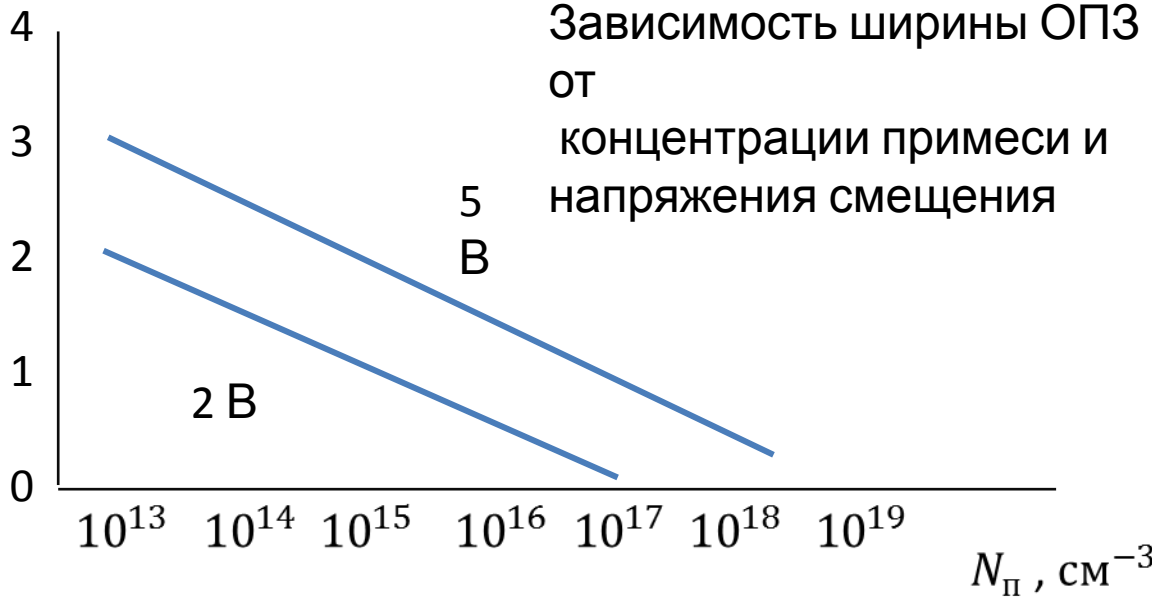


# Микрофотография структуры с оксидом гафния

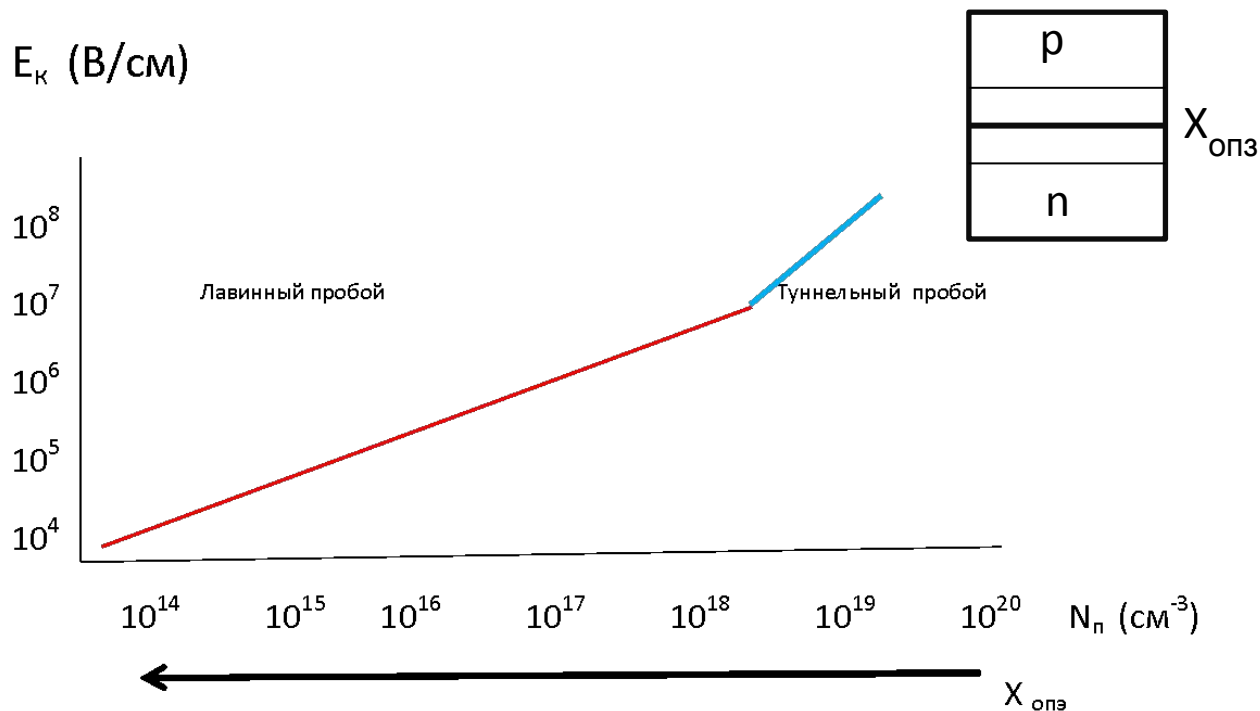


# Ограничения, связанные с потерей полупроводником диэлектрических свойств

$X_{\text{опз}}$   
мкм



# Ограничения, связанные с потерей полупроводником диэлектрических свойств



# Электроперенос, ограничивающий масштабированное уменьшение толщины проводящих пленок

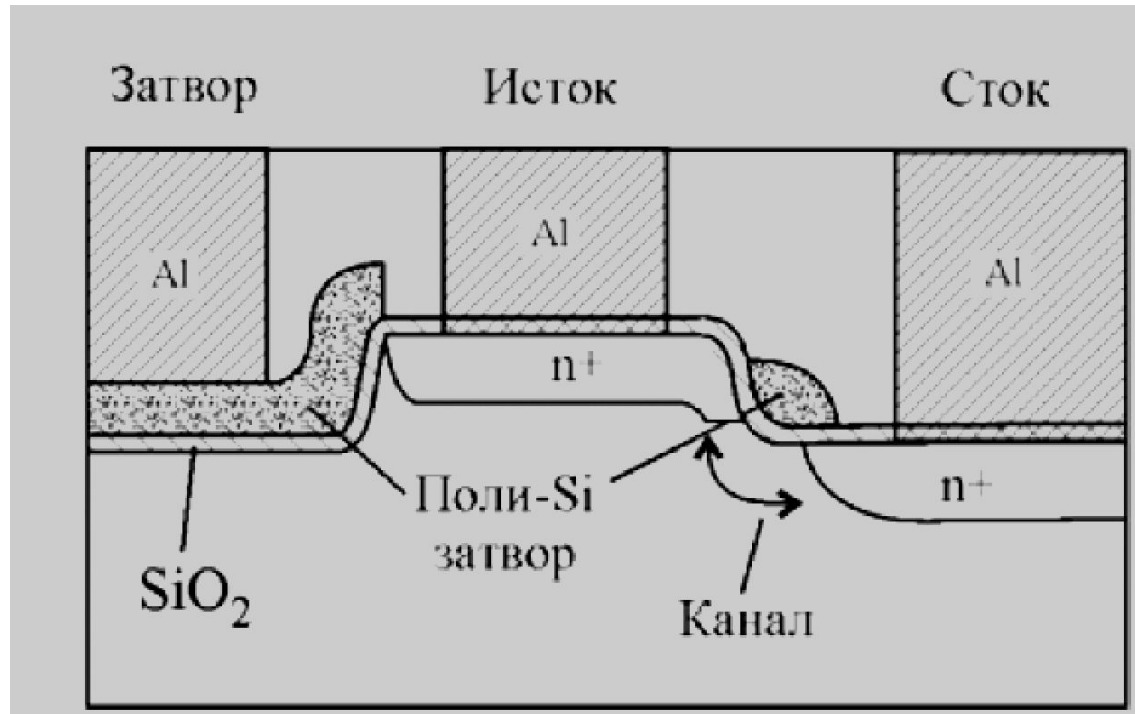


$$t_{от} = J^{-n}$$

где  $t_{от}$  - время до отказа ( час ),  $J$  – плотность тока ( А/см<sup>2</sup>),  
 $n$  - коэффициент ( 1 – при малом токе, 3 – при большом токе).

При  $J = 10^6$  А/см<sup>2</sup>,  $t_{от} = 3$  месяца.

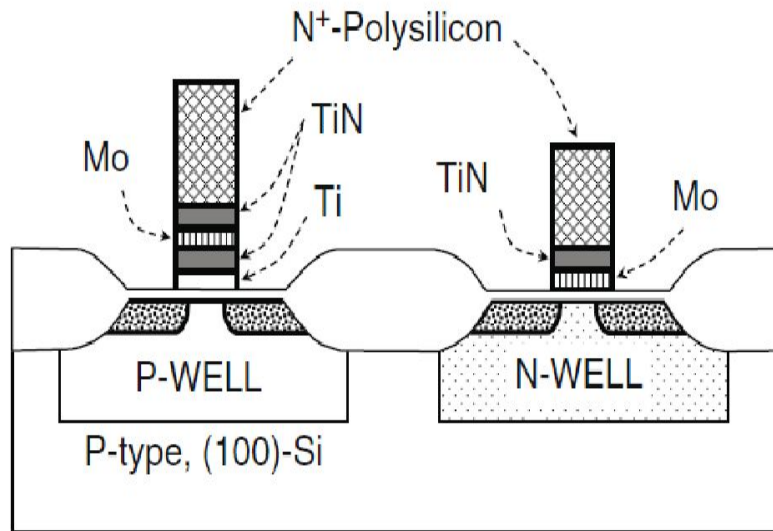
# Конструктивные особенности масштабируемой системы металлизации



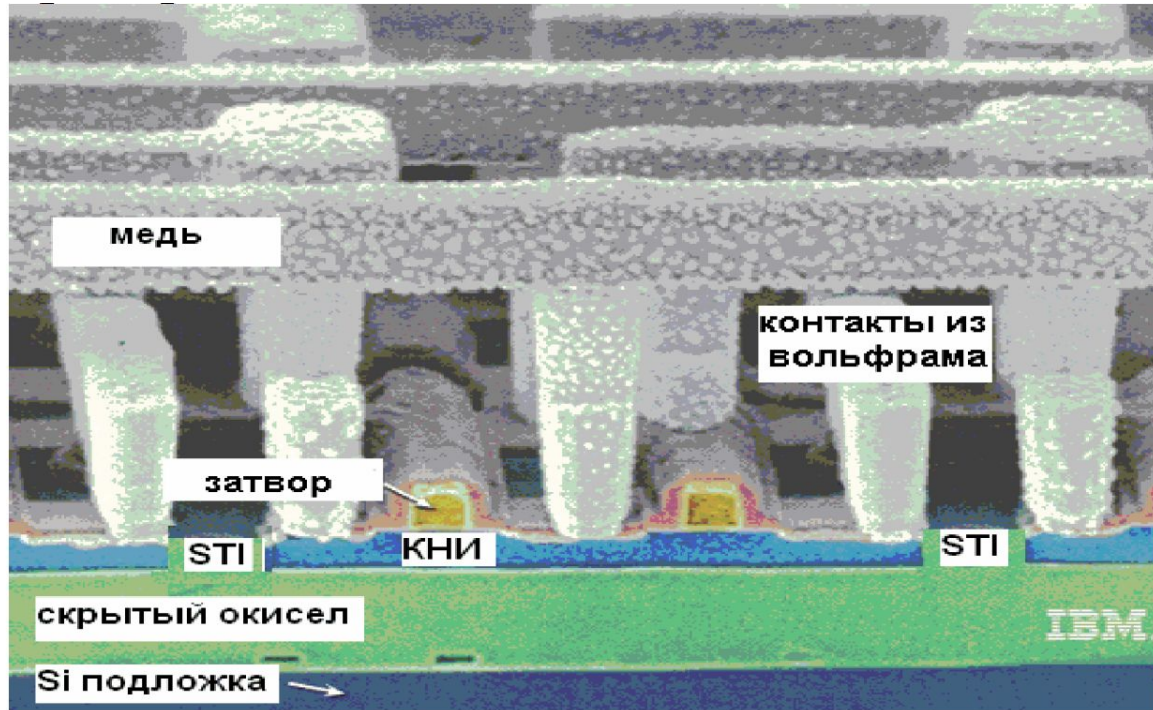
Толщина металлизации не масштабируется!



# Конструктивные особенности масштабируемой системы металлизации



# РЭМ - фотография металлизированной разводки



# Ограничения, связанные с отводом тепла



Максимальная отводимая мощность  
 $20 \text{ Вт/см}^2$  (воздушное охлаждение)

Максимальная степень интеграции

$$M = 2 \times 20 \text{ Вт} / 1 \text{ мкВт} = 4 \times 10^7 !$$

# Предельные значения физических параметров

Предельная величина концентрации примеси:

для рп- перехода –  $2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , для канала МОП Т -  $1,2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$

Предельное электрическое поле в оксиде кремния

$$E = 6 \times 10^6 \text{ В/см}$$

Предельная плотность тока в алюминиевой разводке

$$J = 5 \times 10^5 \text{ А/см}^2$$

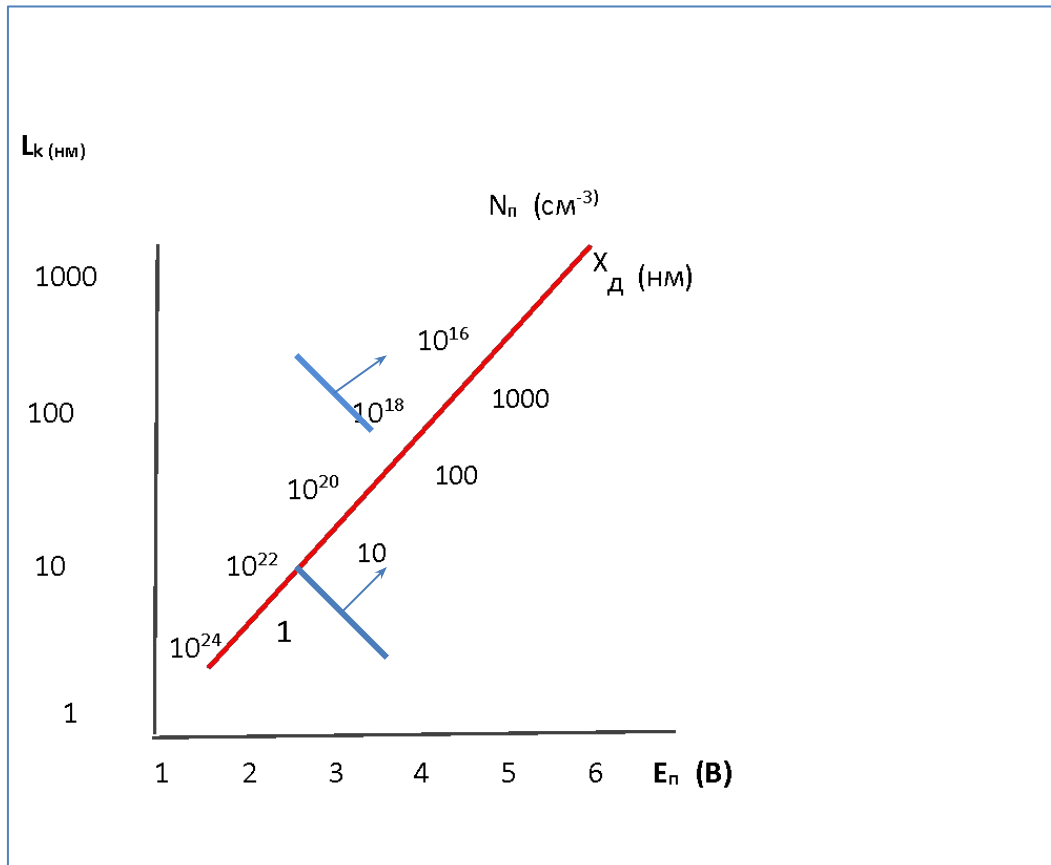
Предельная отводимая от кристалла мощность

$$20 \text{ Вт/см}^2$$

Минимальная толщина оксида кремния

3 нм

# График закона масштабирования с учетом физических ограничений



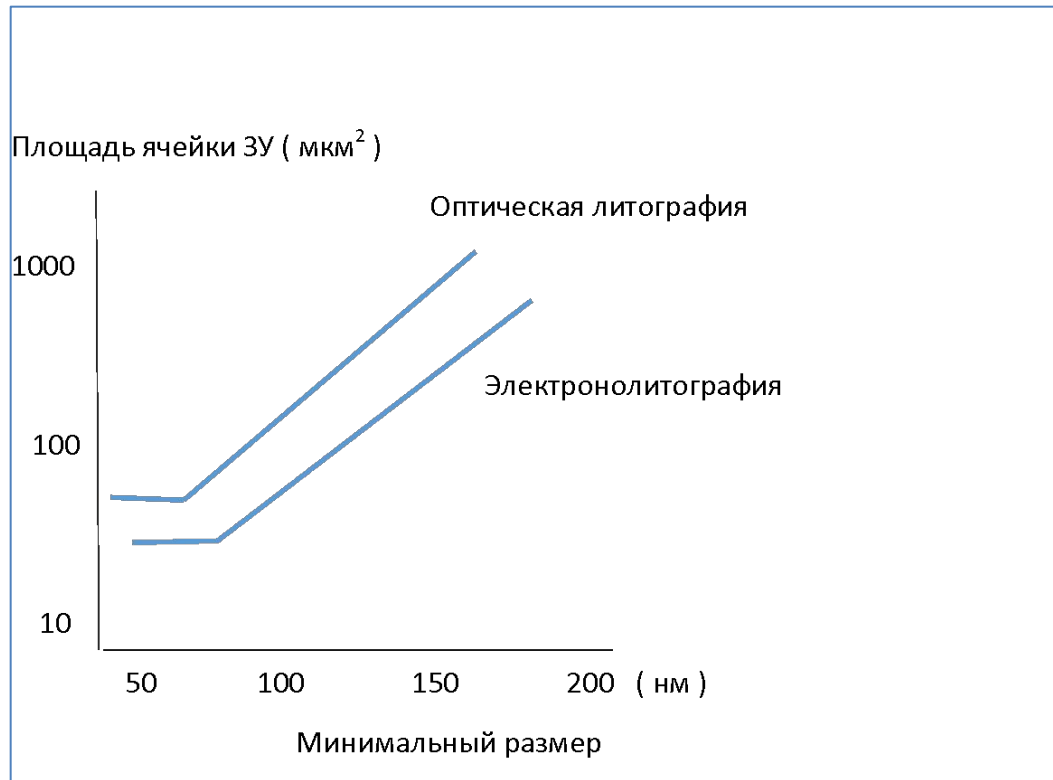
# Ограничения уменьшения размеров традиционного МОП транзистора

Физический параметр	Предельная величина	Параметр, определяющий предел
Толщина подзатворного окисла	2.3 нм	Утечка через подзатворный окисел
Глубина залегания области сток/исток	30 нм	Сопротивление сток-исток
Легирование канала	Пороговое напряжение $V_T=0.25$ В	Утечка сток-исток
Перекрытие стока/истока затвором	15 нм	Сопротивление сток-исток
Длина канала	0.06 мкм.	Утечка сток-исток
Ширина затвора	0.10 мкм.	Утечка сток-исток

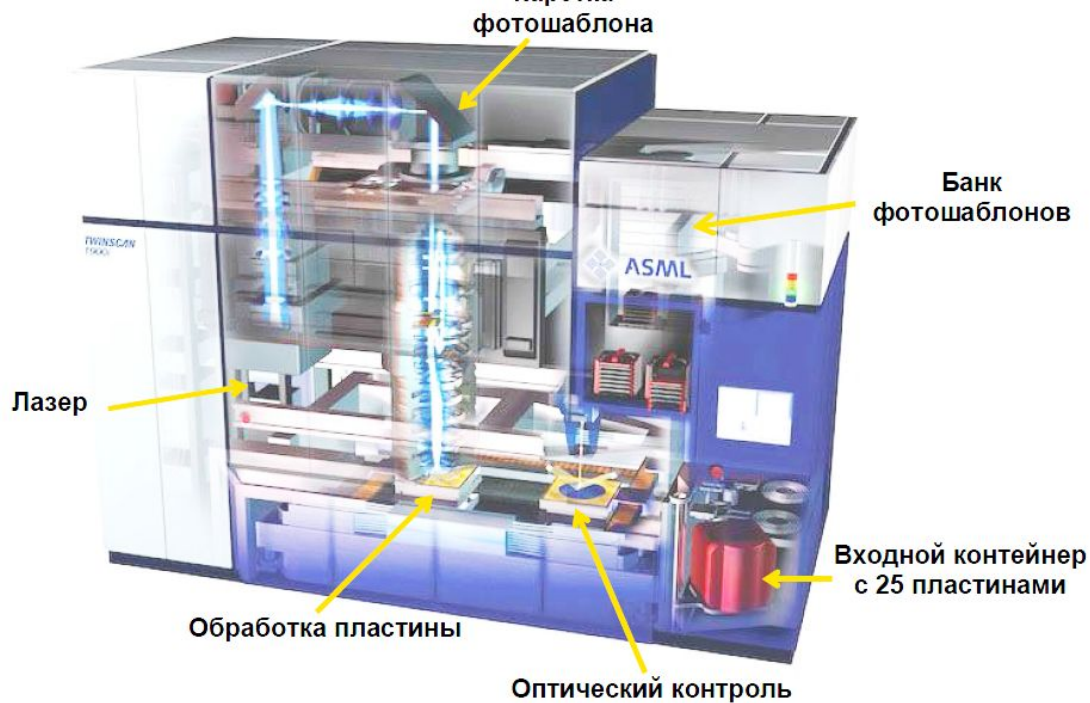
[1]



## 4. Технологические ограничения, связанные с процессом совмещения при литографии



# Установка совмещения и экспонирования на участке фотолитографии





## Таблица факторов, определяющих ПДР ( I = 3 мкм )

**ПДР** – допуск на расположение элементов одного фотошаблона относительно другого, при котором параметры элементов ИС еще удовлетворяют требованиям ТУ

№	Факторы определяющие ПДР	ПДР, мкм
1	Точность расположения элементов на шаблоне	
2	Совместимость шаблонов в комплекте	
3	Неплоскостность шаблона и пластины	
4	Критические размеры рисунка шаблона	
5	Воспроизводилось ширины линии на пластине ( в слое фоторезиста и после травления )	
		1,3

# Масштабируемость ПДР

Для ячейки МОП ИС ЗУ (l = 3 мкм, ПДР = 1,3 мкм)

L мкм	2,5	2,0	1,5	1,0	0,7	0,5
ПДР мкм						
Площадь ячейки %	81	49	25	12	6	3
Эффективность использования площади	1	1,7	3,2	6,8	13,5	27 Увеличение M в 27 раз!

# Таблица факторов, определяющих ПДР ( I = 3 мкм )

**ПДР** – допуск на расположение элементов одного фотошаблона относительно другого, при котором параметры элементов ИС еще удовлетворяют требованиям ТУ

№	Факторы определяющие ПДР	ПДР, мкм
1	Точность расположения элементов на шаблоне	
2	Совместимость шаблонов в комплекте	
3	Неплоскостность шаблона и пластины	
4	Критические размеры рисунка шаблона	
5	Воспроизводилось ширины линии на пластине ( в слое фоторезиста и после травления )	
		1,3 мкм

# Электроперенос, ограничивающий масштабированное уменьшение толщины проводящих пленок

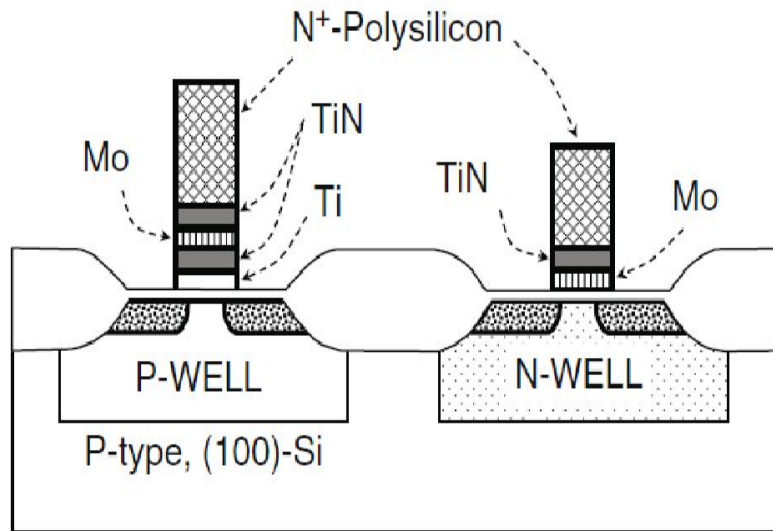


$$t_{от} = J^{-n}$$

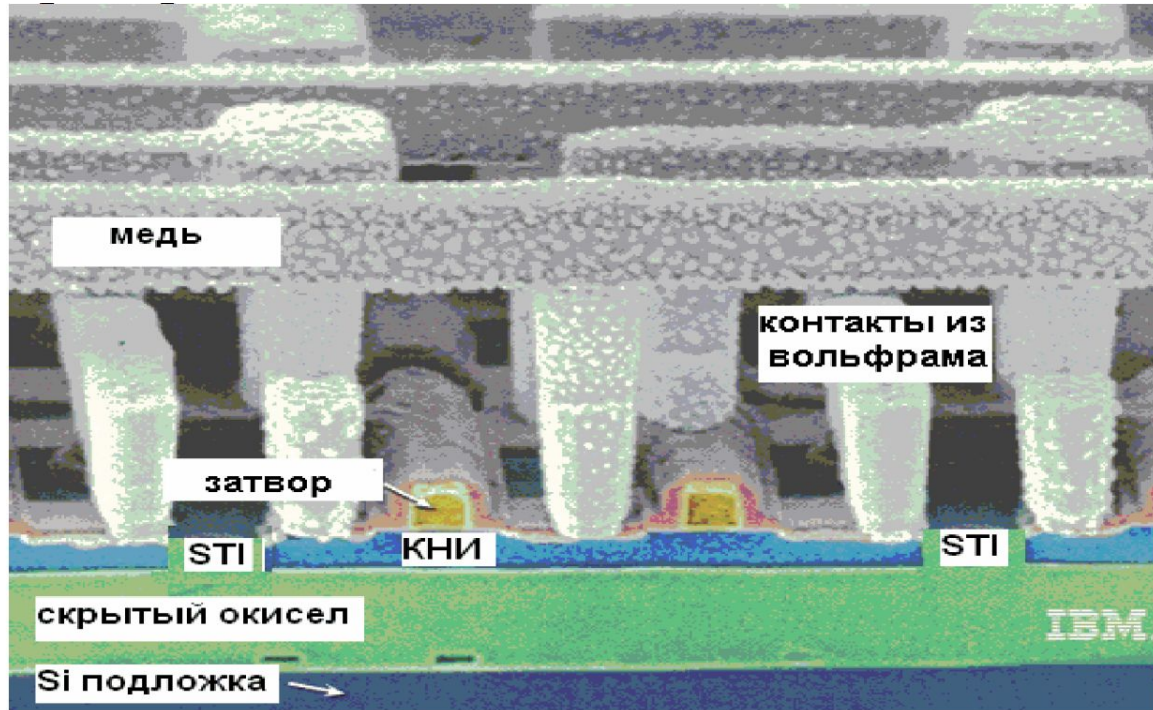
где  $t_{от}$  - время до отказа ( час ),  $J$  – плотность тока ( А/см<sup>2</sup>),  
 $n$  - коэффициент ( 1 – при малом токе, 3 – при большом токе).

При  $J = 10^6$  А/см<sup>2</sup>,  $t_{от} = 3$  месяца.

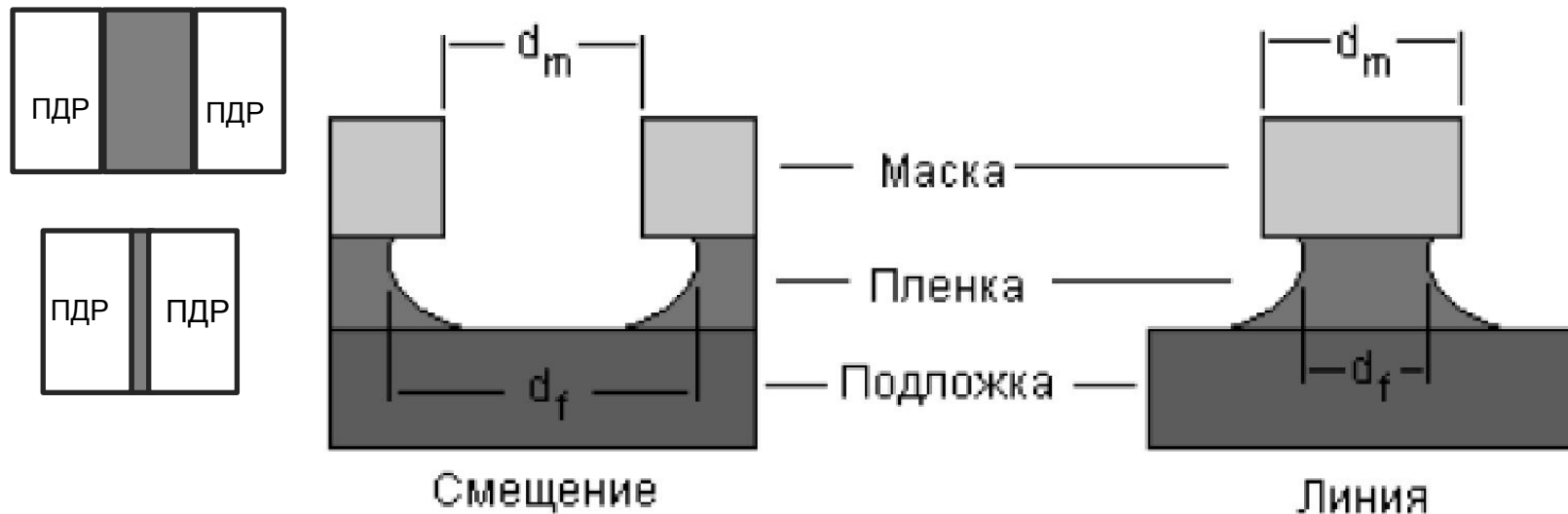
# Конструктивные особенности масштабируемой системы металлизации



# РЭМ - фотография металлизированной разводки



# Причина немасштабируемости линии при литографии



Толщина пленки не масштабируется, что обуславливает постоянство величины бокового подтравливания под маску определяющее ПДР.

# Методы самосовмещения в технологии ИС

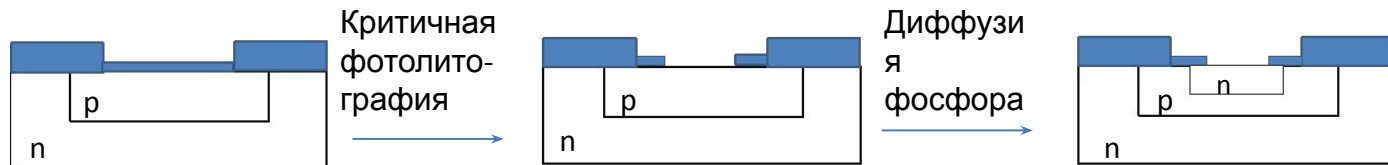
**Self Aligned**

**PSA, APSA, NSA, QSA, SST, VIST. SWAMI. SICOS**

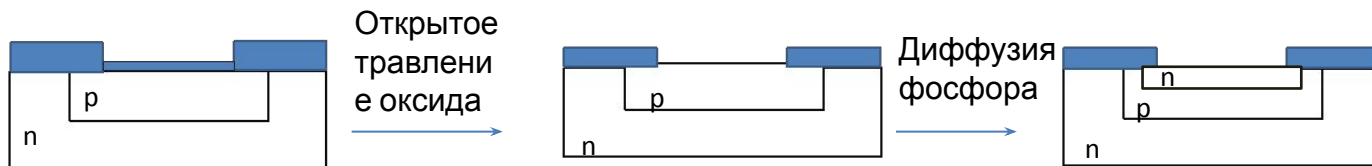


# Самосовмещение с разнотолщинной маской с использованием открытого травления

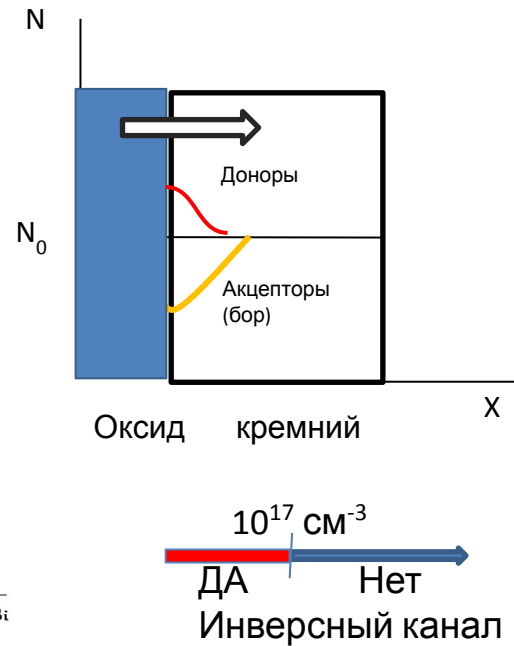
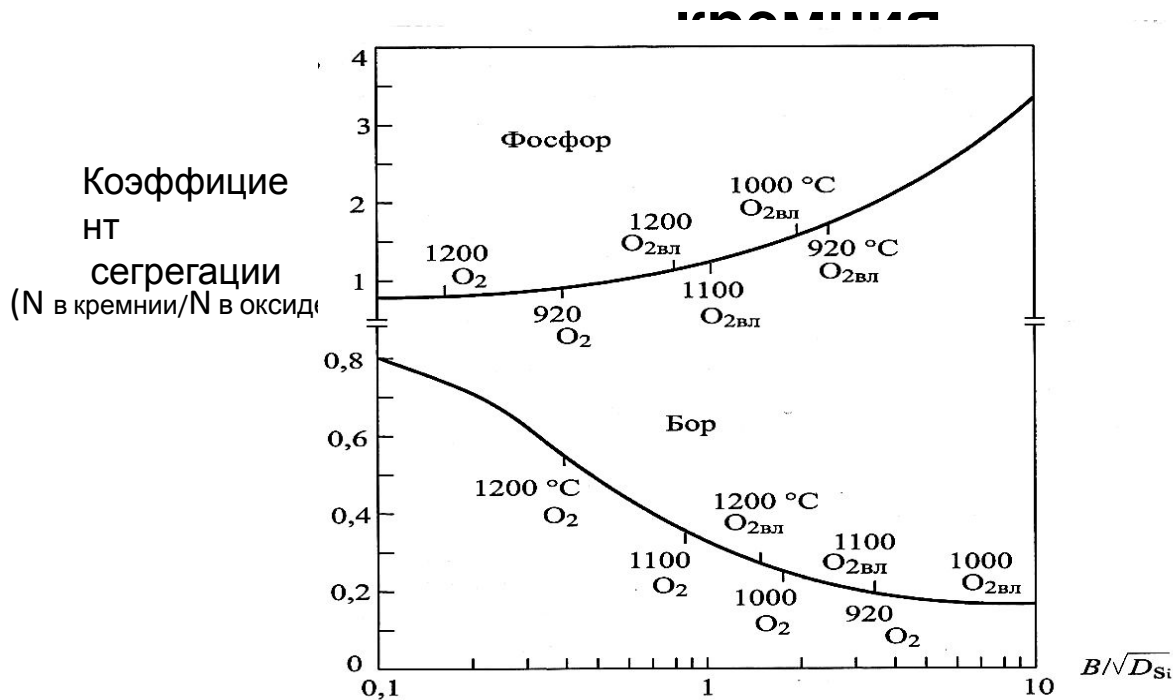
## Традиционный маршрут



## Самосовмещение «Полный эмиттер»



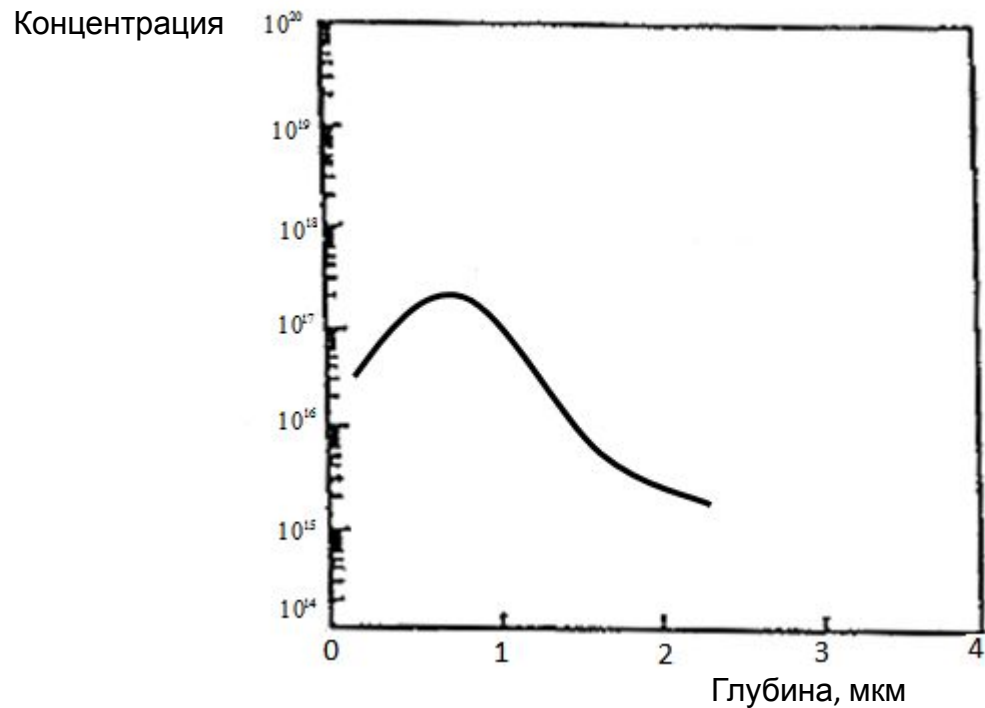
# Влияние температуры и среды на перераспределение примеси при окислении



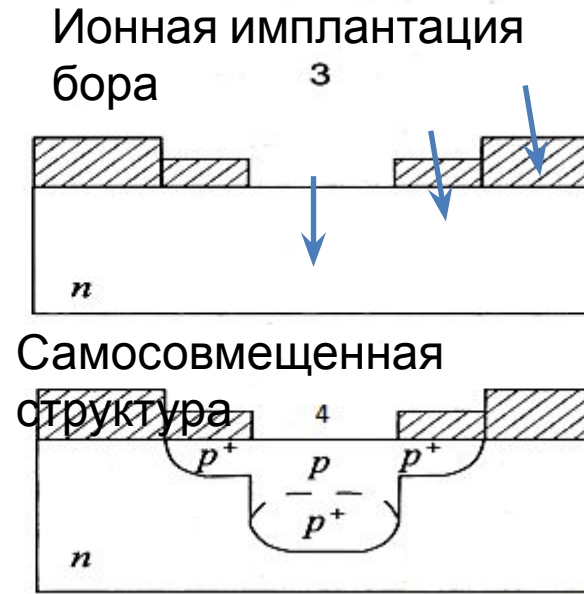
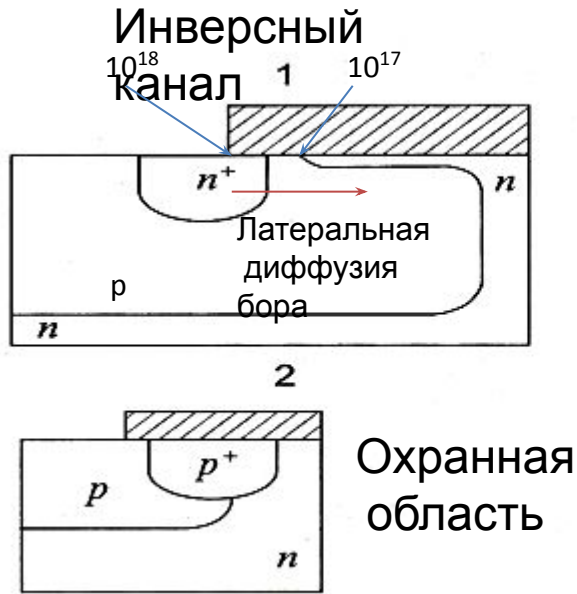
# Инверсионный канал по краю кармана р-типа



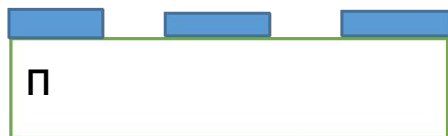
# Распределение примеси по глубине при ионной имплантации



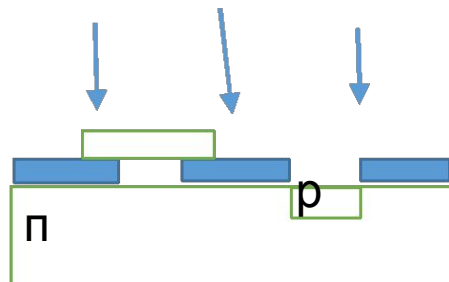
# Самосовмещение с разнотолщиной маской с использованием ионной имплантации



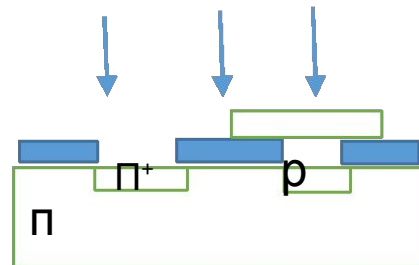
# Самосовмещение с помощью твердой маски



Ионная  
имплантация  
бора

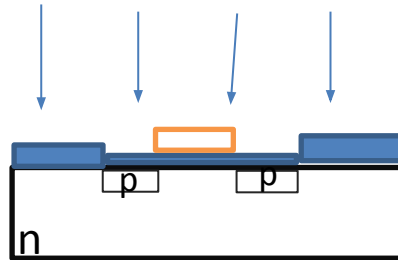


Ионная  
имплантация  
фосфора



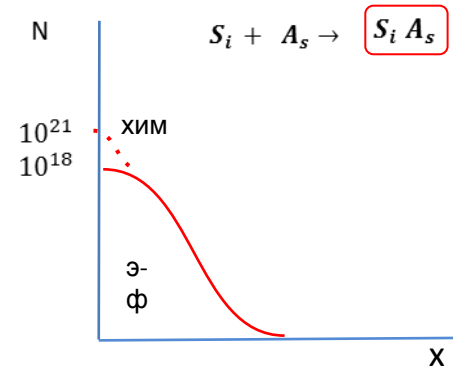
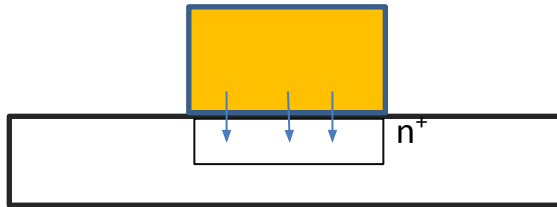
# Самосовмещение с использованием электродов в качестве маски

Ионная  
имплантация  
бора



# Самосовмещение с использованием легированного поликремниевого электрода

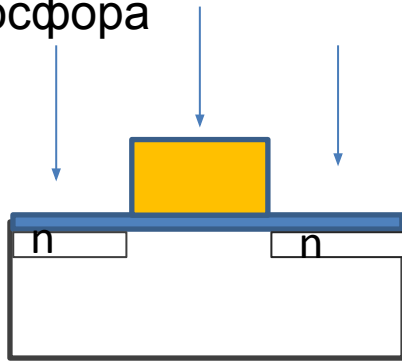
Поликремний,  
легированный  
мышьяком



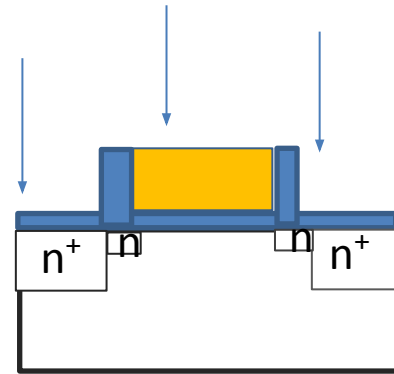


# Самосовмещение с помощью «спейсеров»

Ионная имплантация  
фосфора



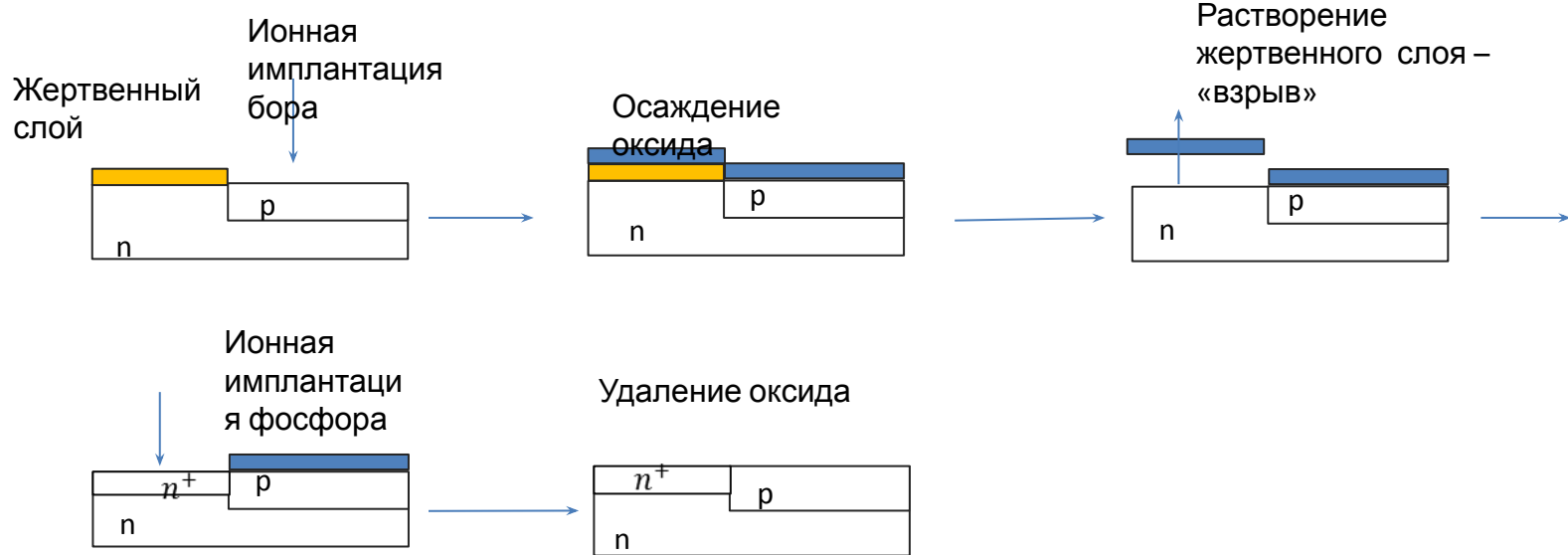
Ионная имплантация мышьяка



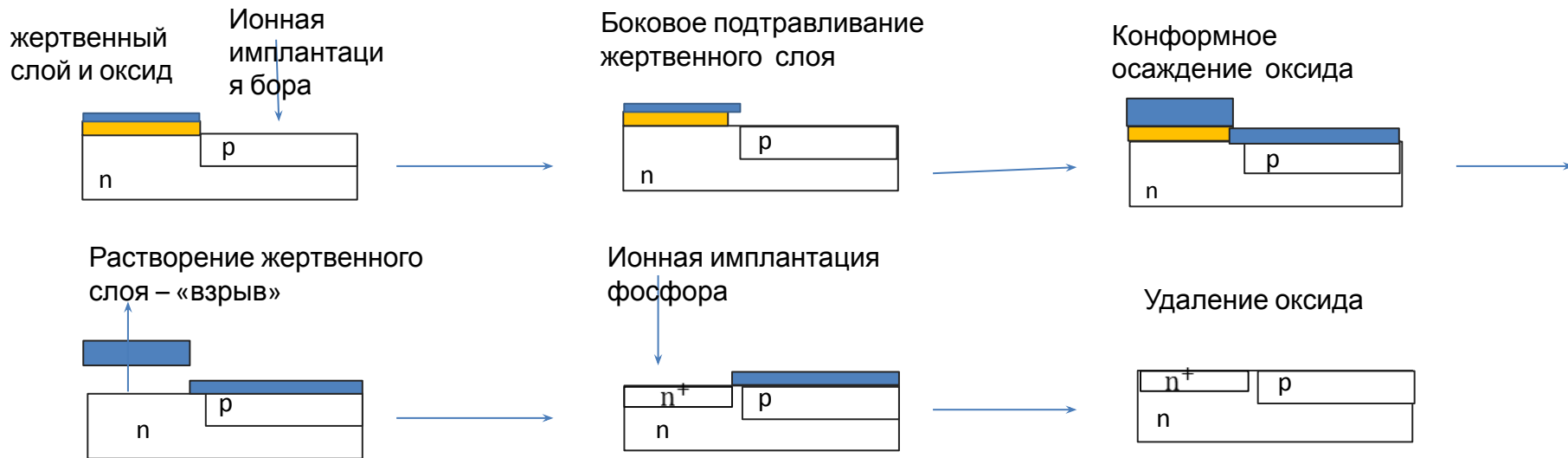
→  
Конформное  
осаждение и  
РИТ оксида  
кремния

# Самосовмещение с использованием Lift off («взрывной»)

## ТЕХНОЛОГИИ

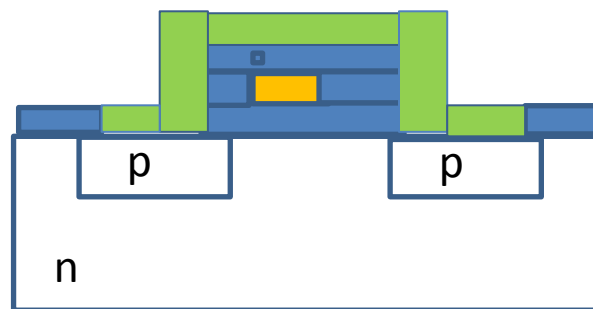
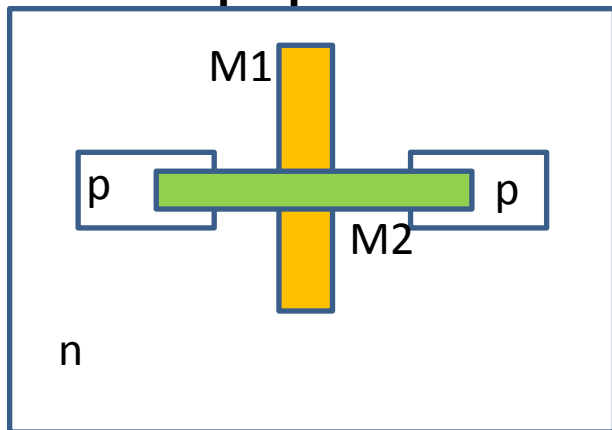


# Самосовмещение с использованием бокового подтравливания и «взрывной» технологии



# Перекрестная металлизация

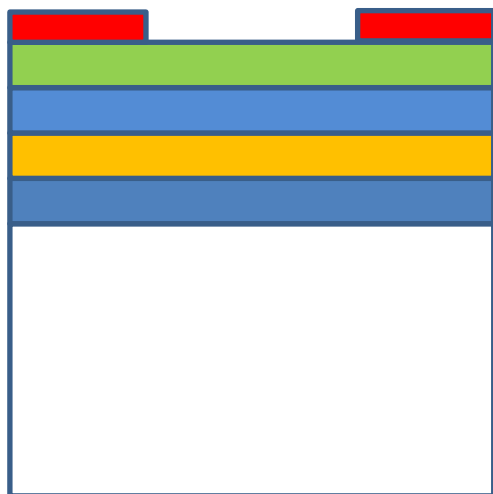
## Фотографии



1. Вскрытие окон под диффузию
2. Формирование M1
3. Вскрытие окон под контакты
4. Формирование M2

# Самосовмещенный процесс создания перекрестной металлизации

- В скобках специфические травители



Фоторезист

Нитрид магния (перекисно-аммиачная смесь)

Пиролитический оксид кремния (плавиковая кислота)

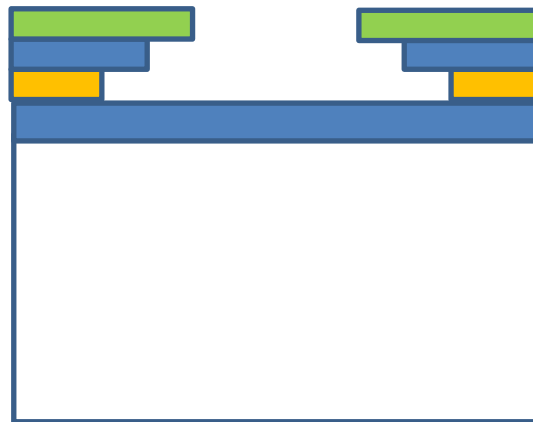
Полиимид (кислородная плазма)

Термический оксид кремния (плавиковая кислота)

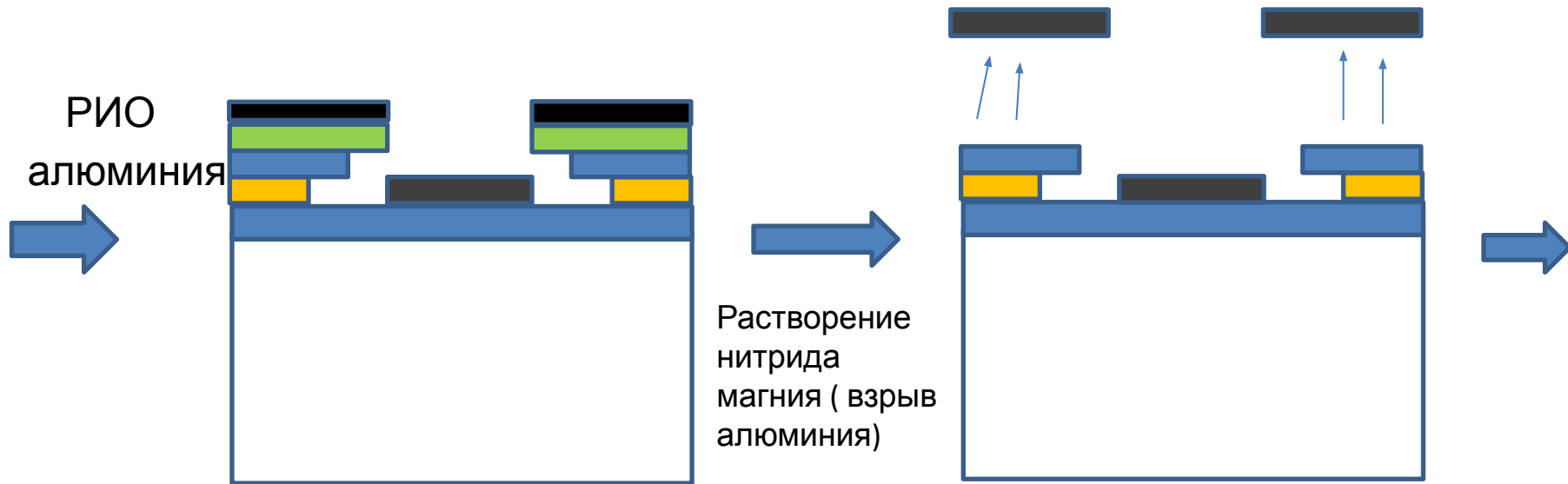
Кремний (п-типа)

# Самосовмещенный процесс создания перекрестной металлизации

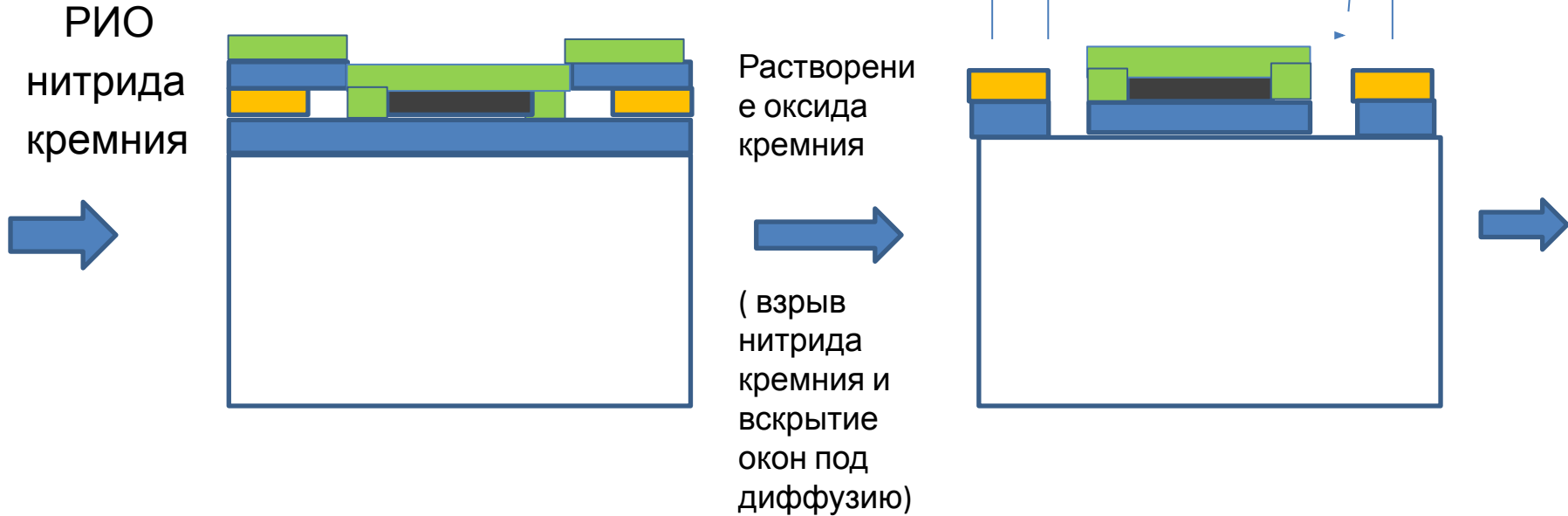
Последовательное травление окон в слоях и боковое подтравливание в специфических травителях и удаление фоторезиста



# Самосовмещенный процесс создания перекрестной металлизации

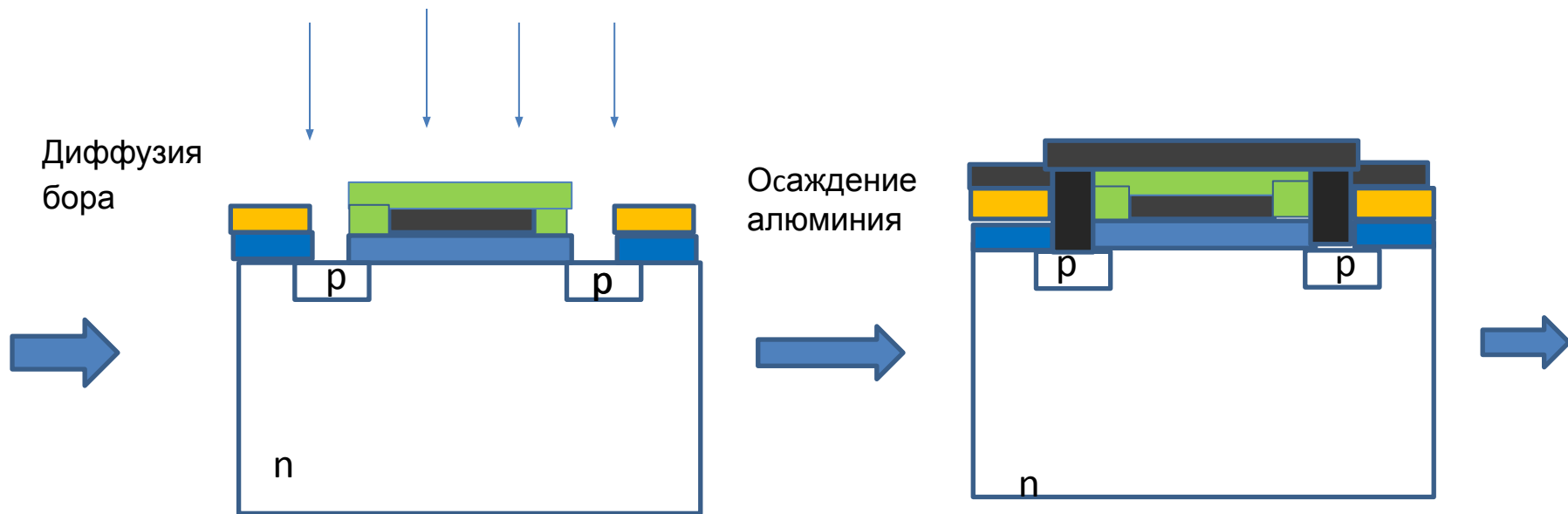


# Самосовмещенный процесс создания перекрестной металлизации



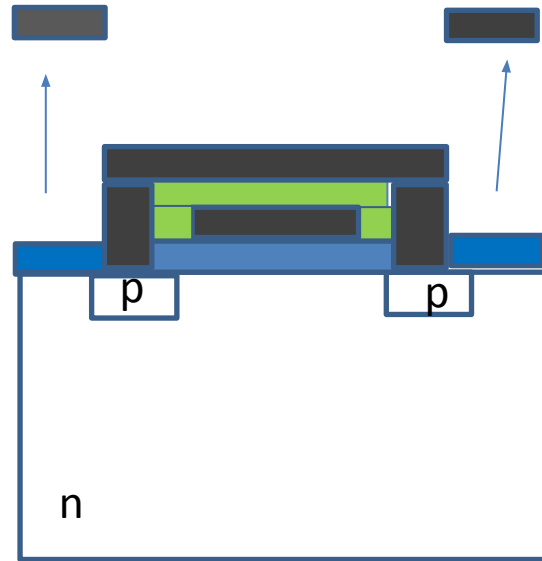


# Самосовмещенный процесс создания перекрестной металлизации



# Самосовмещенный процесс создания перекрестной металлизации

Растворение  
полиимида  
( взрыв  
алюминия)



# Фундаментальные физические ограничения уменьшения размеров

Параметр	Физическое ограничение
Минимальная величина одного элемента, 0,03 нм	Статистические флуктуации легирования подложки, разрешение фоторезиста, космические лучи и радиоактивность, конечная ширина p-n перехода
Толщина подзатворного диэлектрика, 2,3 нм	Туннельные точки через диэлектрик
Минимальное напряжение питания 0,025 В	Тепловой потенциал $kT/q$
Минимальная плотность тока, $10^{-6}$ А/см <sup>2</sup>	Дискретность заряда электрона, флуктуации встроенного заряда
Минимальная мощность, $10^{12}$ Вт/элемент при $f=1$ кГц	Шумы, тепловая энергия, диэлектрическая постоянная
Предельное быстродействие, 0,03 нс	Скорость света
Максимальное напряжение питания	Пробой подзатворного диэлектрика, смыкания областей истока и стока
Максимальное легирование подложки	Туннельный пробой p-n перехода стока
Максимальная плотность тока	Электромиграция, падения напряжения на паразитных сопротивлениях контактов
Максимальная мощность	Теплопроводность подложки и компонентов схемы
Количество элементов на кристалл	Совокупность всех ранее перечисленных ограничений

