

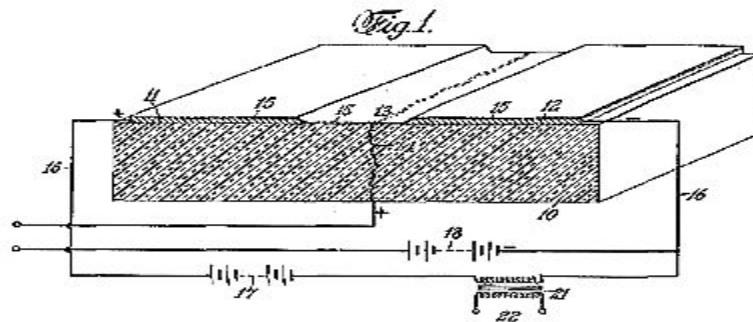
## Лекция 6

Формирование подзатворного диэлектрика



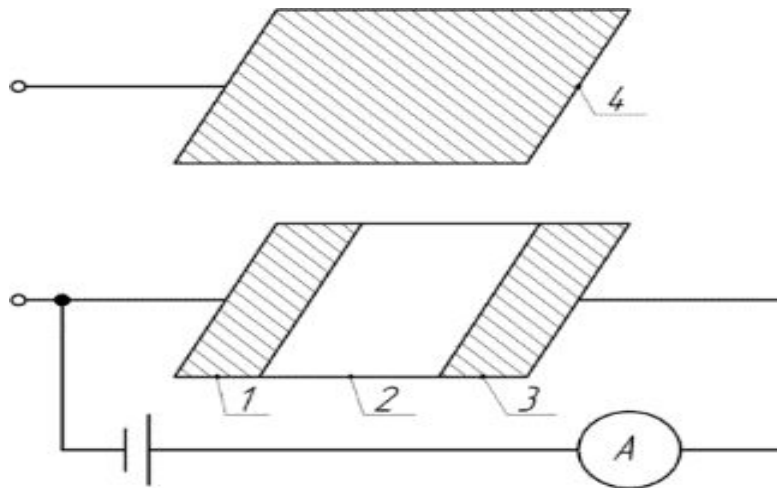
# Нереализованный «полевой транзистор» Лиленфельда.

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

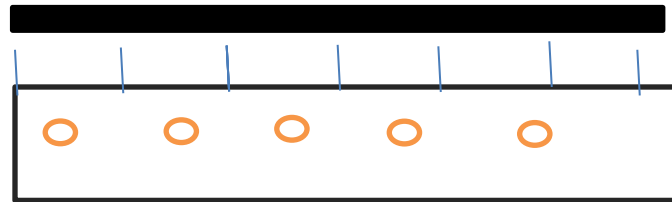
# Принцип работы полевого транзистора



# Почему не работал МДП-транзистор

- 
- 

Управляющий электрод



Ловушки -  $10^{14}\text{см}^{-2}$   
Носители -  $10^{12}\text{см}^{-2}$

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

• На один носитель - 100 ловушек!

# Разработчики метода пассивации поверхности кремния оксидом

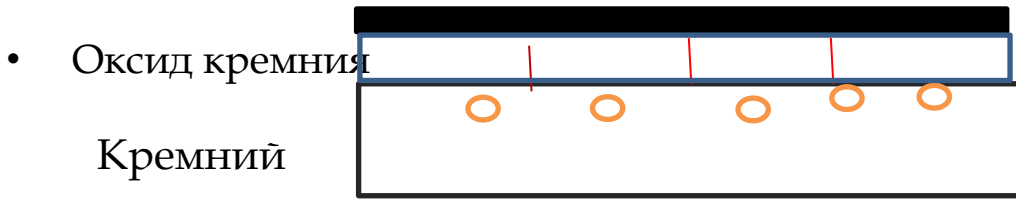
М.Аталла  
М.Кант



# Почему стал работать МОП-транзистор

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

Управляющий электрод



Ловушки -  $10^{11} \text{см}^{-2}$

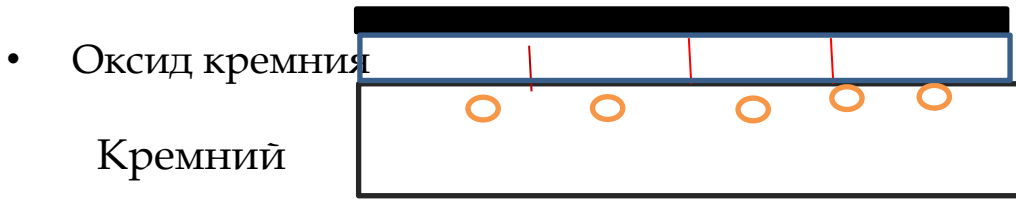
Носители -  $10^{12} \text{см}^{-2}$

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

# Почему стал работать МОП-транзистор

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

Управляющий электрод

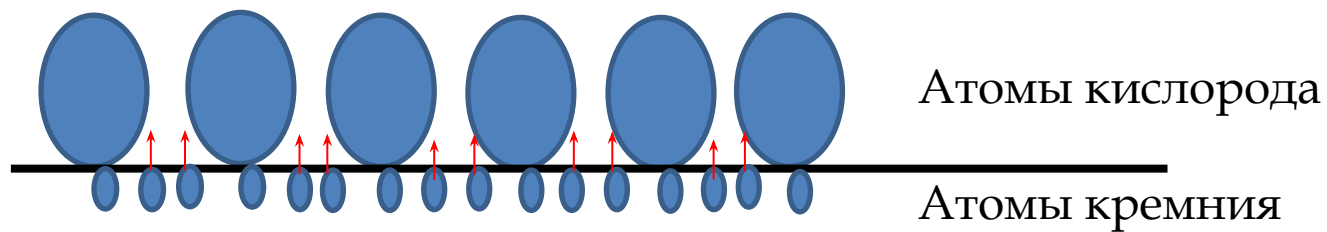


Ловушки -  $10^{11} \text{см}^{-2}$

Носители -  $10^{12} \text{см}^{-2}$

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

# Почему неполная пассивация поверхности кремния





# Пороговое напряжение МОП-транзистора

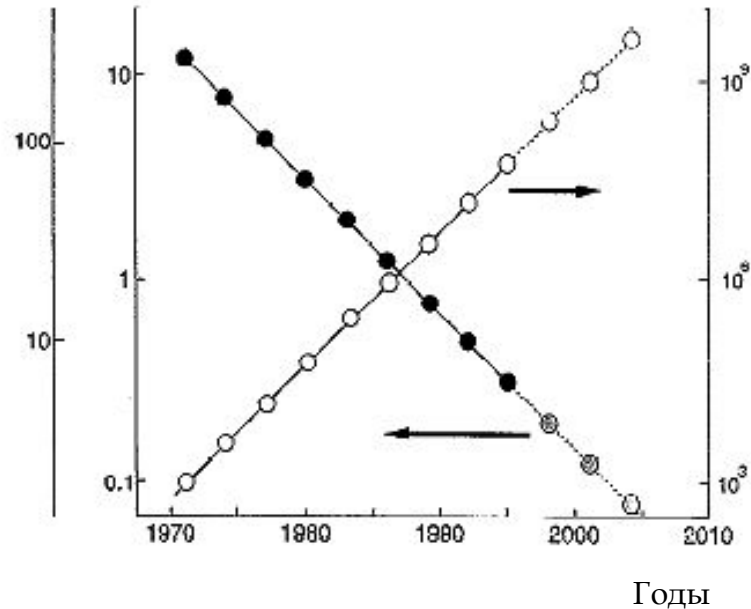


# Динамика изменения толщины подзатворного окисла

Толщина окисла (нм)

Минимальный размер (мкм)

Степень интеграции

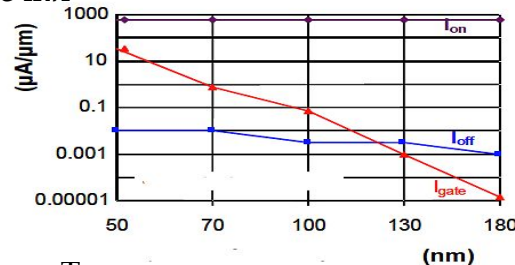


[ 1 ]

# Проблемы подзатворного диэлектрика



Токи утечки



Ток насыщения

Подпороговый ток

Ток через диэлектрик

Технологические поколения

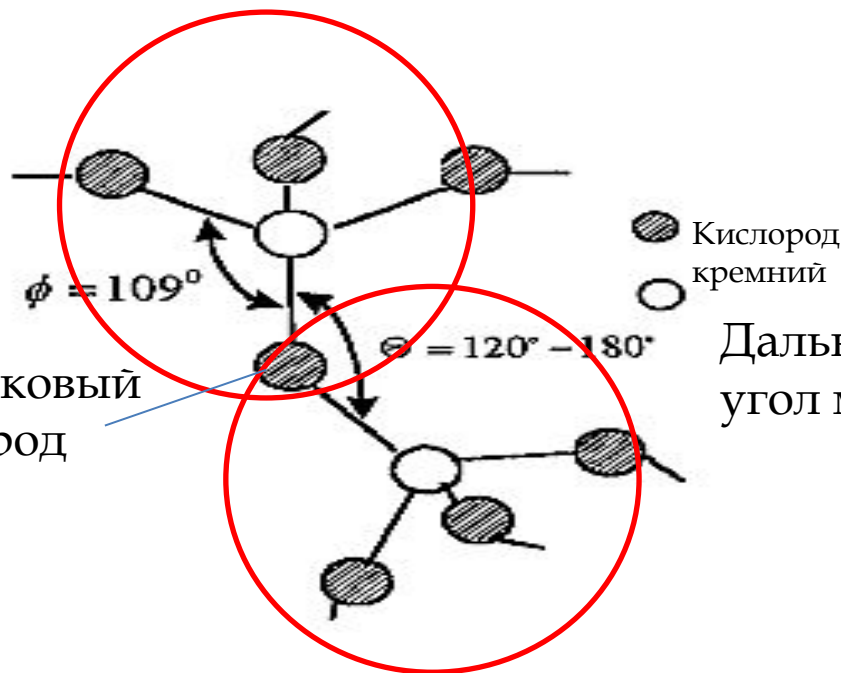
[ 1 ]



# Структура оксида кремния

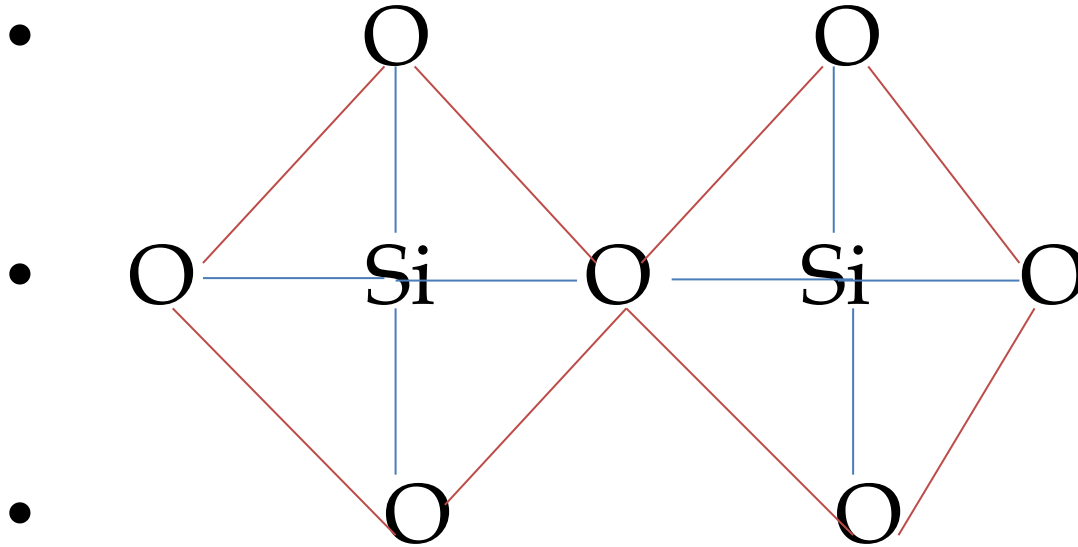
Ближний  
порядок  
(тетраэдр)

Мостиковый  
кислород



Дальний порядок (   
угол между связями )

# Ближний порядок



Расстояние между атомами в тетраэдре

Si - O    1,69 Å

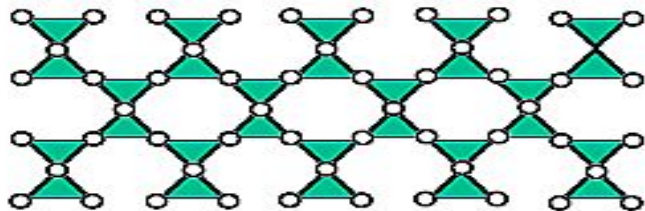
50% -  
ковалентная  
50% - ионная

O - O    2,65 Å

Si - Si    3,0 Å

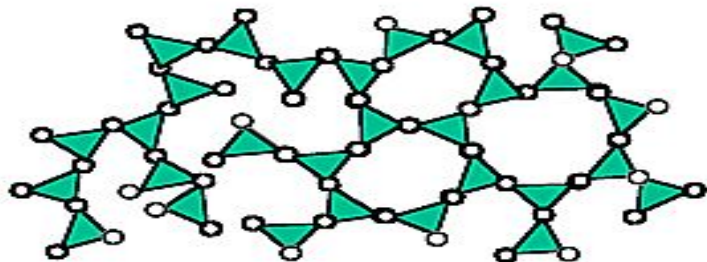
# Структура оксида кремния

Дальний  
порядок  
Ближний  
порядок



Кристаллическое  
состояние  
( $d = 2,62 \text{ г/см}^3$ )

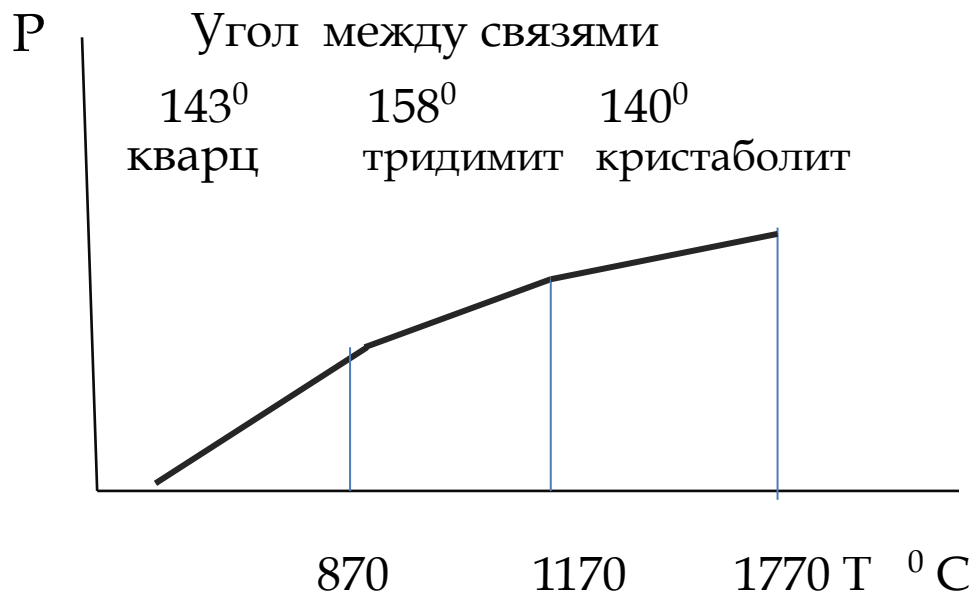
Только  
ближний  
порядок



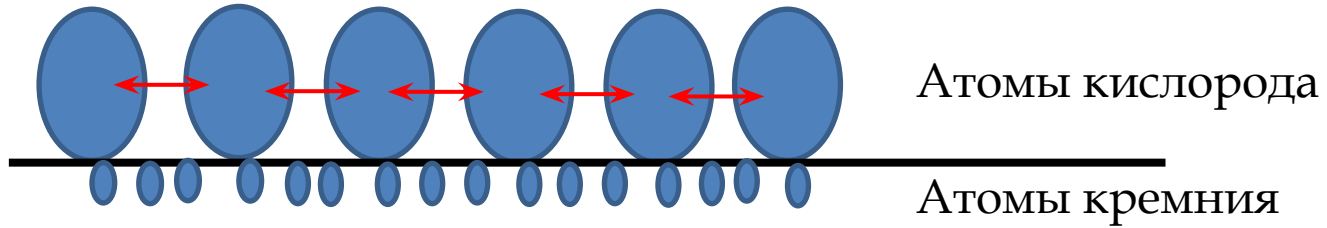
Аморфное  
состояние  
( $d = 2,2 \text{ г/см}^3$ )

# Кристаллические модификации оксида кремния

- 
- 



# Почему растёт аморфный оксид кремния





# Дефекты аморфного оксида кремния

1. Отсутствие кремния
1. Отсутствие кислорода ( кислородная вакансия.)
1. Решеткообразующие примеси – замена кремния ( бор, фосфор, сурьма, мышьяк)
1. Решеткопреобразующие примеси – замена кислорода ( водород, гидроксил, натрий, калий, алюминий )
5. Кремний в междоузлии
6. Примеси ( ранее перечисленные) в междоузлии

# Последствия локальной кристаллизации аморфного оксида кремния

- 1. Разрушение решетки оксида
- 2. Ухудшение маскирующих свойств оксида
- 3. Токи утечки через оксид
- 4. Увеличенная скорость диффузии через оксид
- 5. Ухудшение эффекта пассивации поверхности кремния
- 6. Возникновение внутренних механических локальных напряжений
- 7. Повреждение металлизации
- 8. Изменение зарядового состояния системы кремний-оксид
- 9. Уменьшение подвижности носителей в канале МОПТ

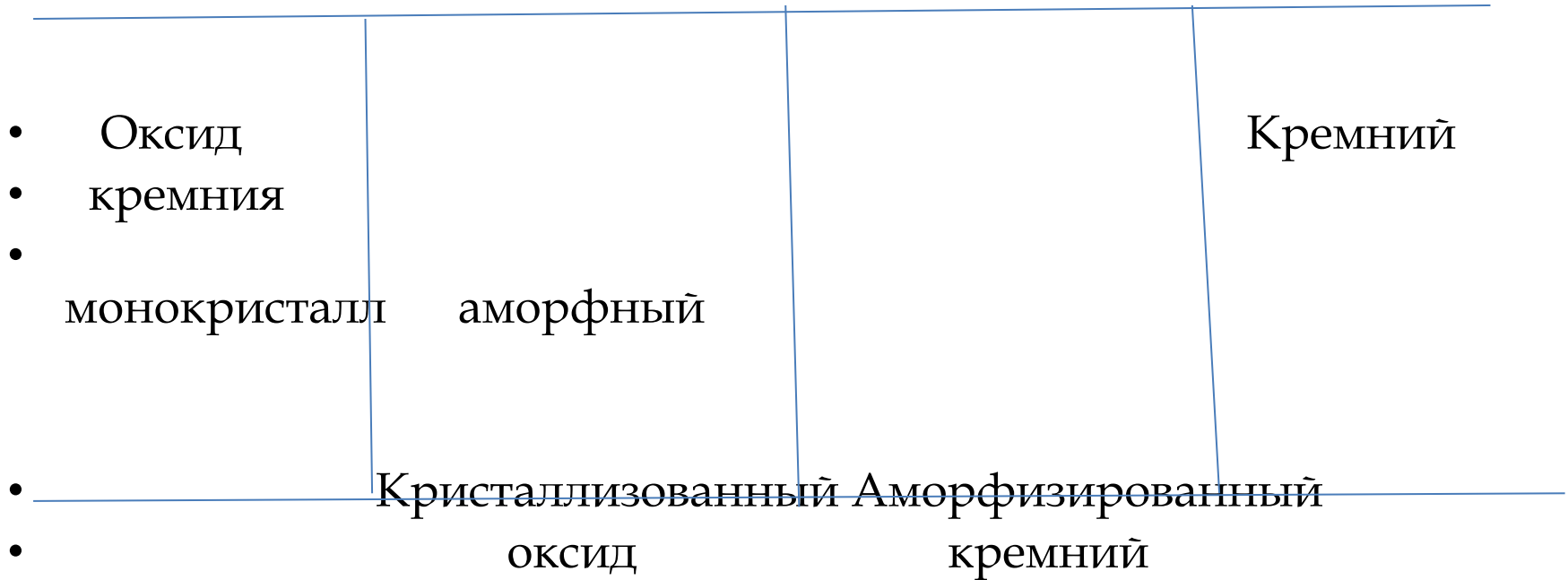
# Факторы способствующие локальной кристаллизации аморфного оксида кремния

- Длительные высокотемпературные обработки
- Медленное охлаждение
- Трёхвалентные решоткообразующие примеси ( бор )
- Решоткопреобразующие примеси (водород, гидроксил, натрий, алюминий )
- Частицы кварцевой пыли
- Металлические примеси в междоузлии

# Факторы подавляющие локальную кристаллизацию аморфного оксида кремния

- Уменьшение температуры и длительности термообработок.
- Быстрое охлаждение
- Пятивалентные решеткообразующие примеси ( фосфор, сурьма, мышьяк )
- Окисление в сухом кислороде
- Стерильность процесса окисления

# Структура системы кремний-оксид

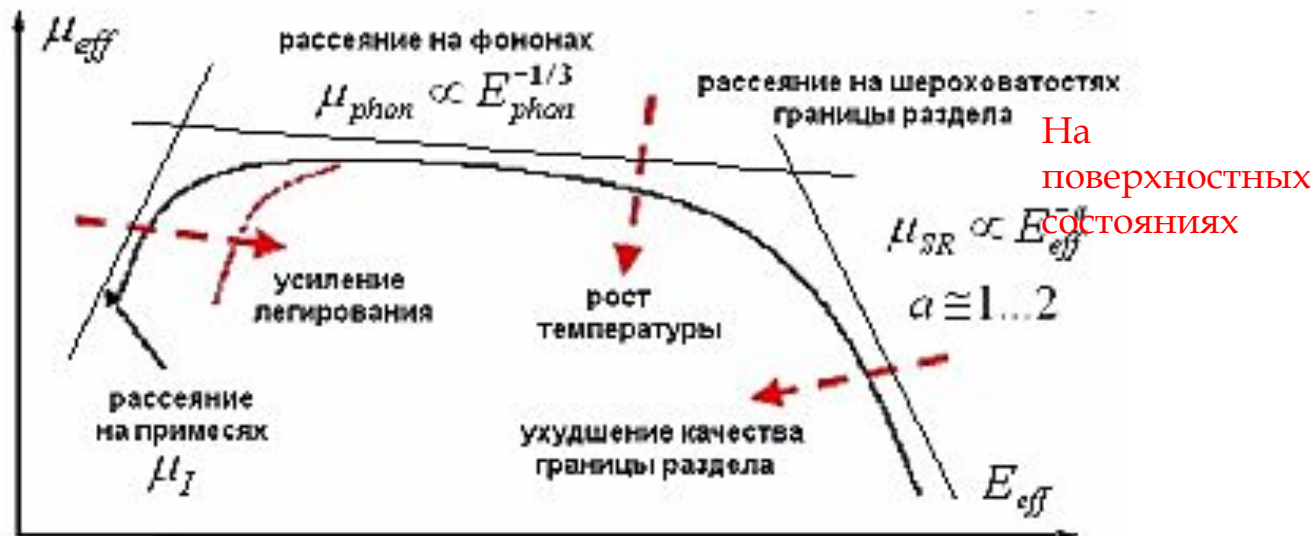


- **Зарядовое состояние системы**
- **кремний-оксид**

# Пороговое напряжение МОП-транзистора



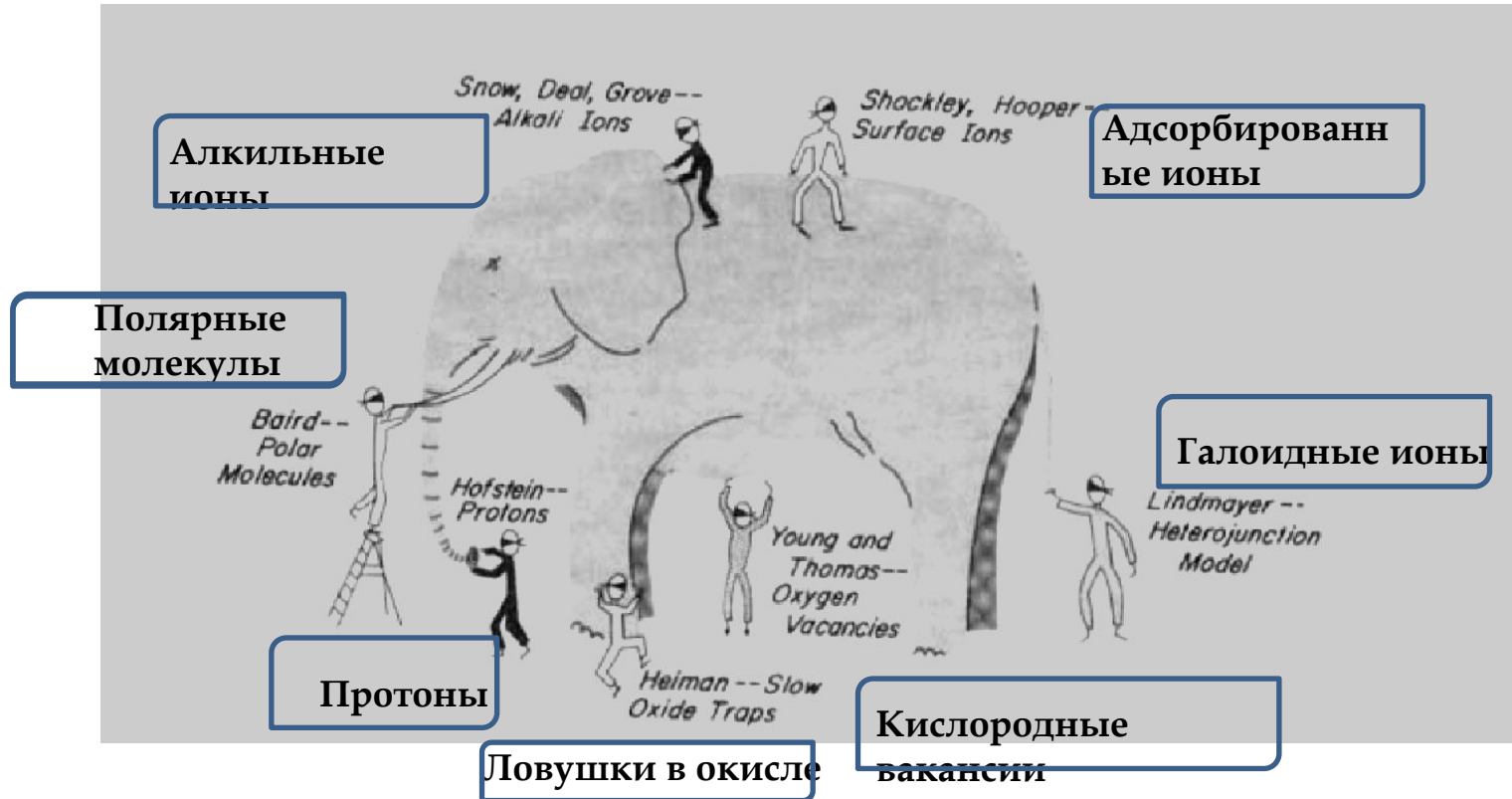
# Зависимость подвижности носителей от температуры и электрического поля



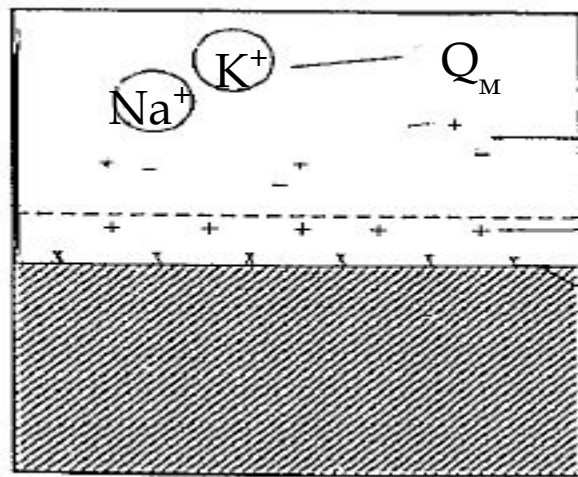


# Зарядовое состояние системы кремний-оксид

Слон и семеро слепцов Р.Донована



# Заряды в системе кремний-оксид кремния



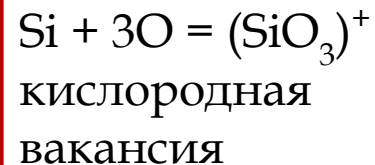
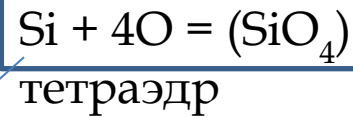
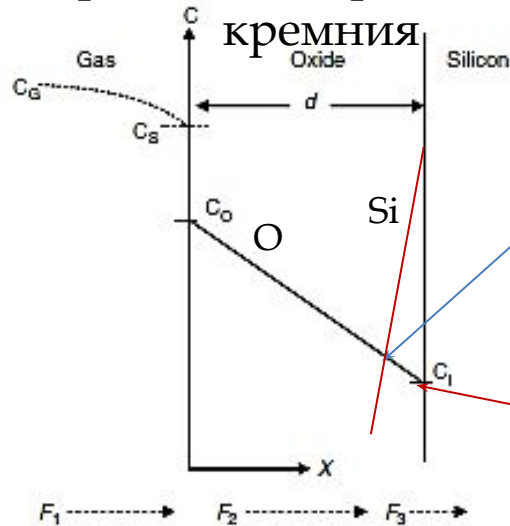
- $Q_M$  Мигрирующий заряд
- $Q_r$  Радиационный заряд
- $Q_{II}$  Постоянный заряд
- $Q_{ПС}$  Заряд поверхностных состояний

# Постоянный заряд

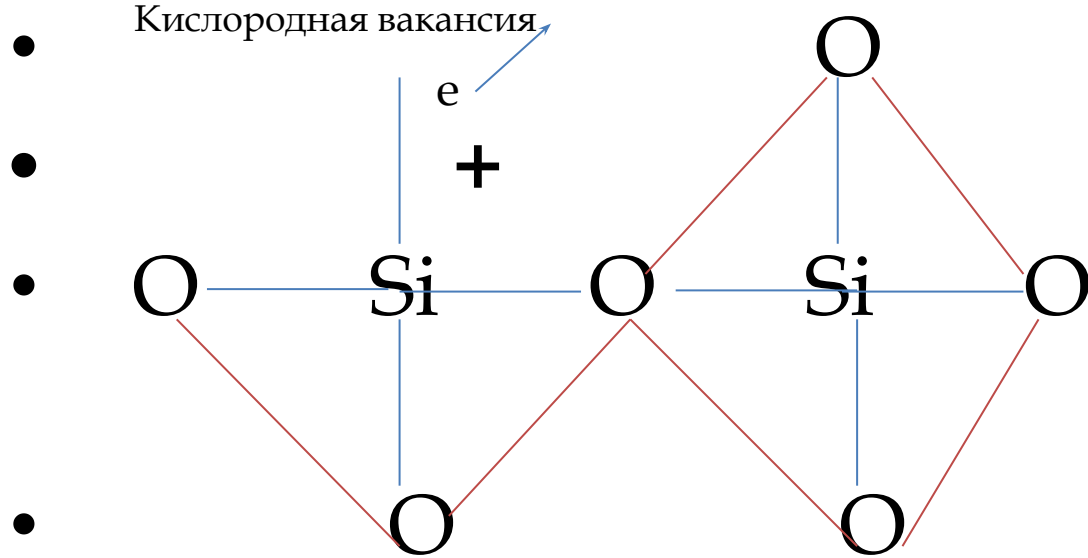
- Расположен в оксиде вблизи поверхности кремния ( $20 \text{ A}^0$ )
  - Всегда положительный
  - Не зависит от типа проводимости и концентрации примеси в кремнии
  - Большой при ориентации поверхности кремния (111)
  - Не меняется под воздействием внешних электрических полей
  - Уменьшается при увеличении температуры окисления
  - Увеличивается при окислении в парах воды
- Уменьшается при термообработке в азоте или аргоне при  $400 \text{ }^0\text{C}$

# Образование кислородных вакансий

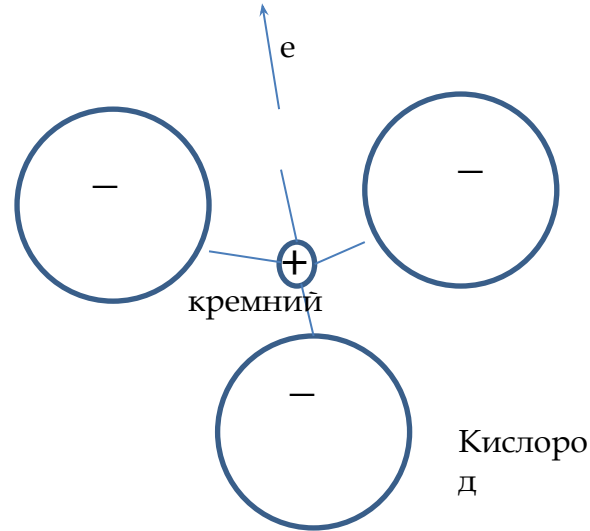
Адсорбция диффузия химическая реакция  
кислорода кислорода и  
кремния



# Постоянный заряд



# Почему кислородная вакансия донор

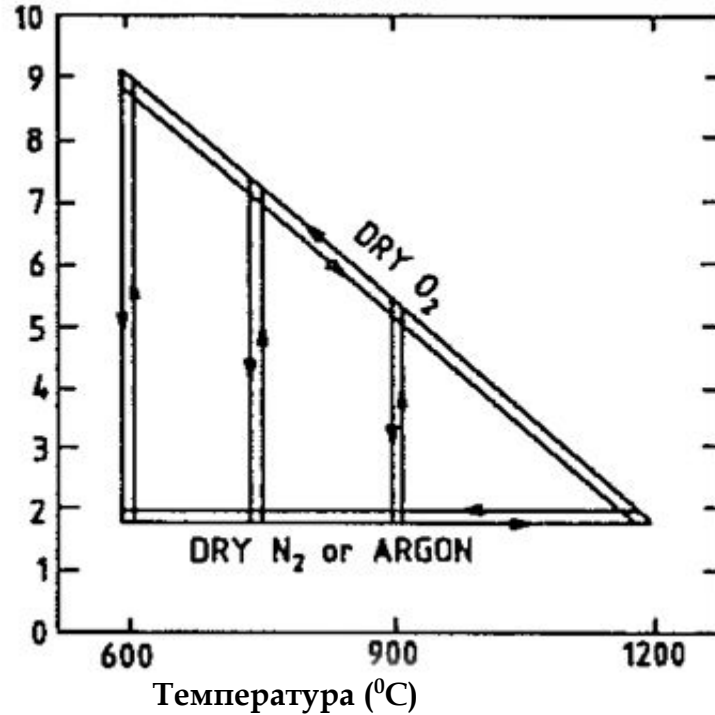


Связь кислород-кремний

50% - ионная,  
50% ковалентная

# Треугольник Дилла

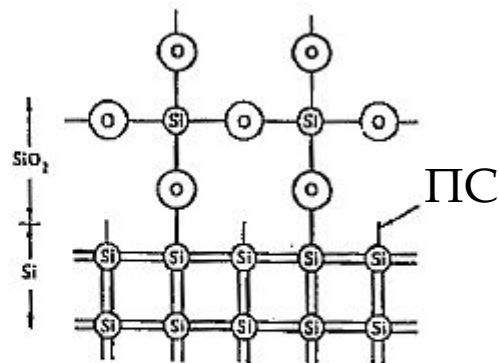
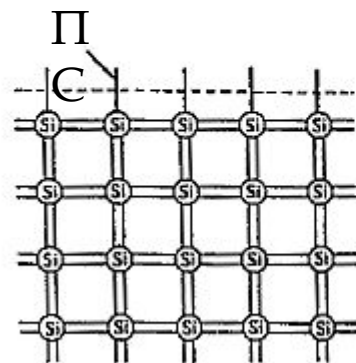
Фиксированный заряд  $Q, Jq (10^{11} \text{ см}^{-2})$



[ 2 ]



# Поверхностные состояния в системе кремний-оксид



[ 2 ]

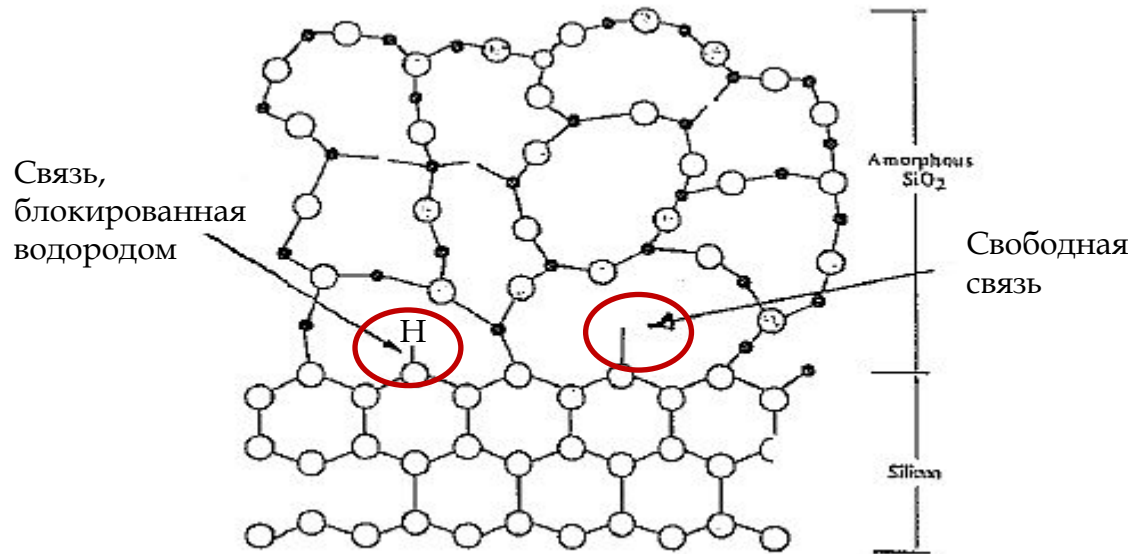




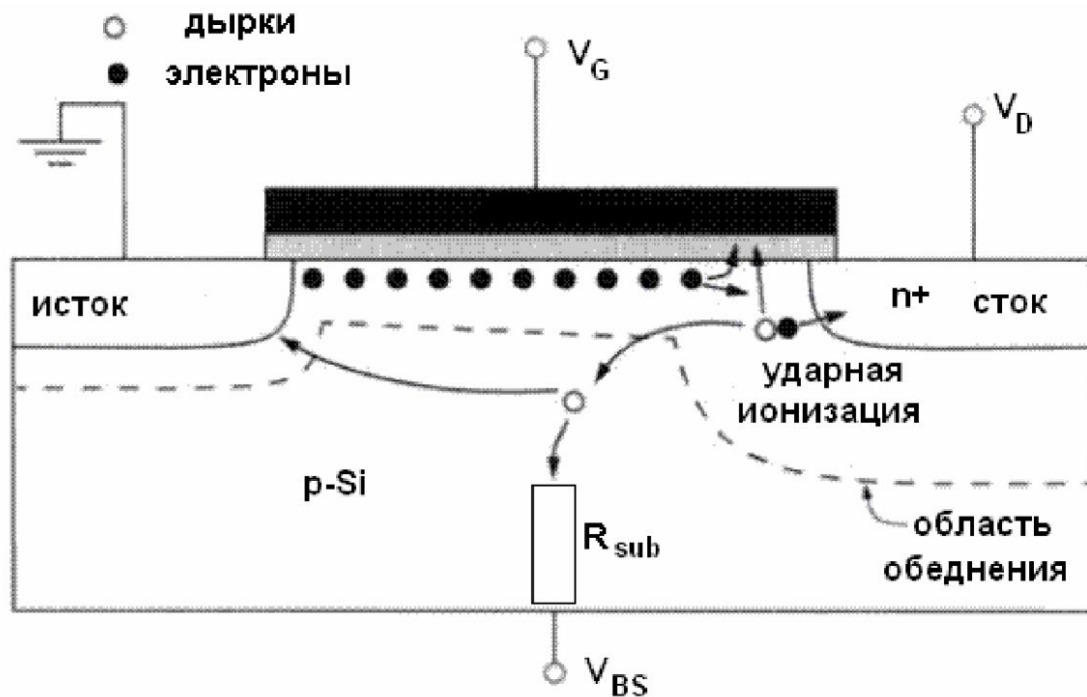
# Поверхностные состояния

- Расположены на поверхности кремния
- Больше при ориентации поверхности кремния (111)
- Уменьшаются при окислении в парах воды
- Уменьшаются при обработке хлором
- Величина и знак заряда зависит от внешнего потенциала
- Имеются быстрые и медленные состояния
- Увеличивается при избыточной концентрации водорода

# Свободные связи в объеме окисла кремния

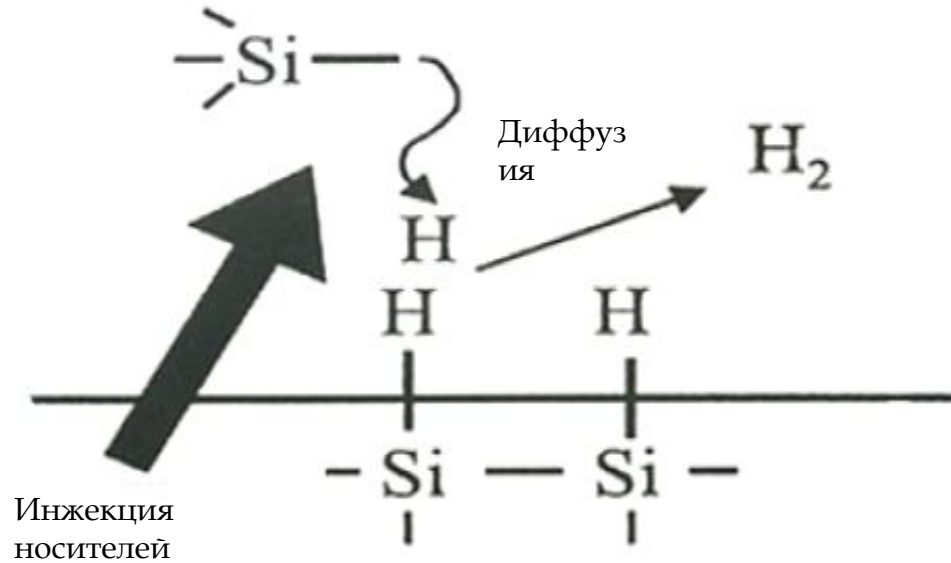


# Эффект образования горячих носителей



# Влияние водорода в окисле на плотность поверхностных состояний и захват горячих носителей

•



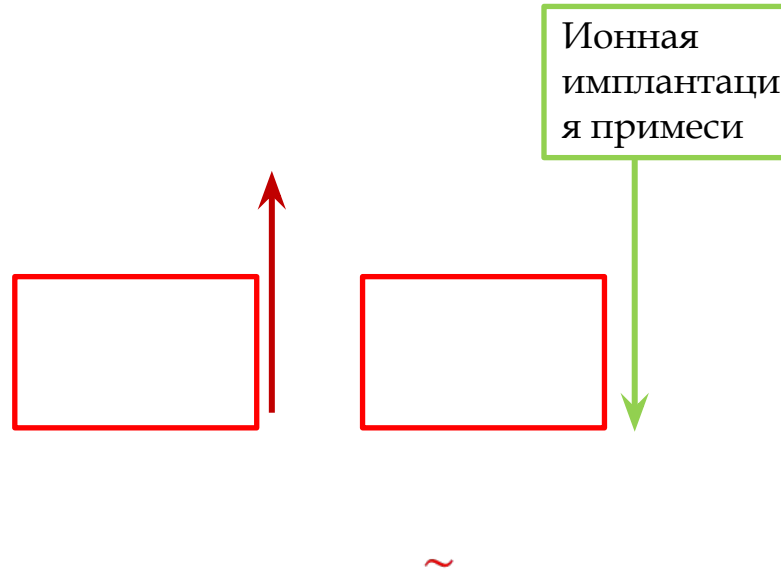
# Мигрирующий заряд

- Расположен в объеме оксида
- Чаще положительный ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{H}^+$  )
- Уменьшается при введении в оксид фосфора
- Увеличивается при нанесении на оксид алюминия и последующей низкотемпературной обработке
- Увеличивается при окислении в парах воды
- Уменьшается при термообработке в сухом кислороде

# Оптимизация процесса подзатворного окисления кремния

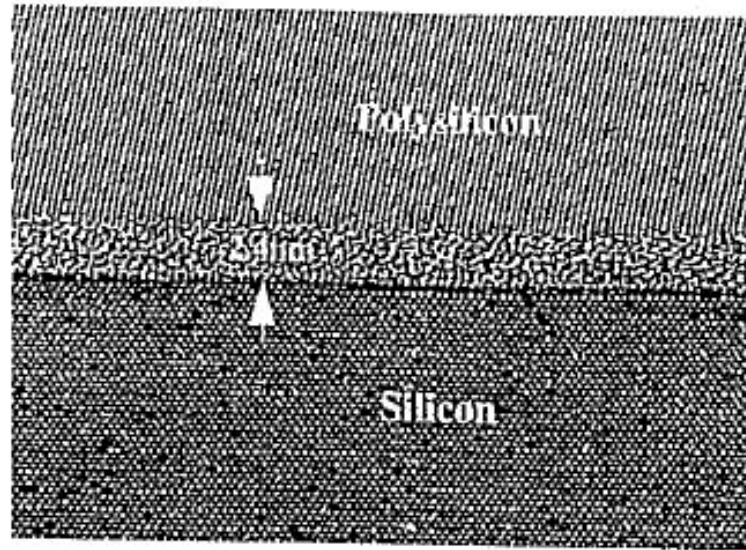
Компонент заряда в системе кремний-оксид	На какой параметр МОПТ влияет	Оптимальная температура окисления	Оптимальная среда процесса окисления
Постоянный заряд	Величина порогового напряжения МОПТ	Высокая	Сухой кислород
Поверхностные состояния	Подвижность носителей в канале МОПТ	Низкая	В парах воды

# Пороговое напряжение МОП-транзистора



Режим окисления:  $800^{\circ}\text{C}$ , пары воды (пирогенное окисление)

# Микрофотография МОП структуры

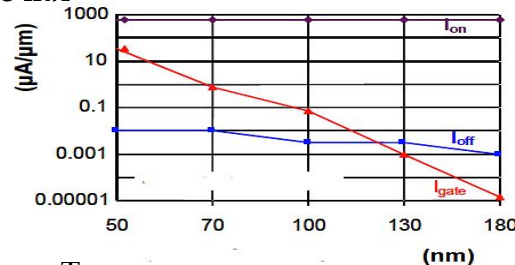




# Проблемы подзатворного диэлектрика



Токи утечки



Ток насыщения

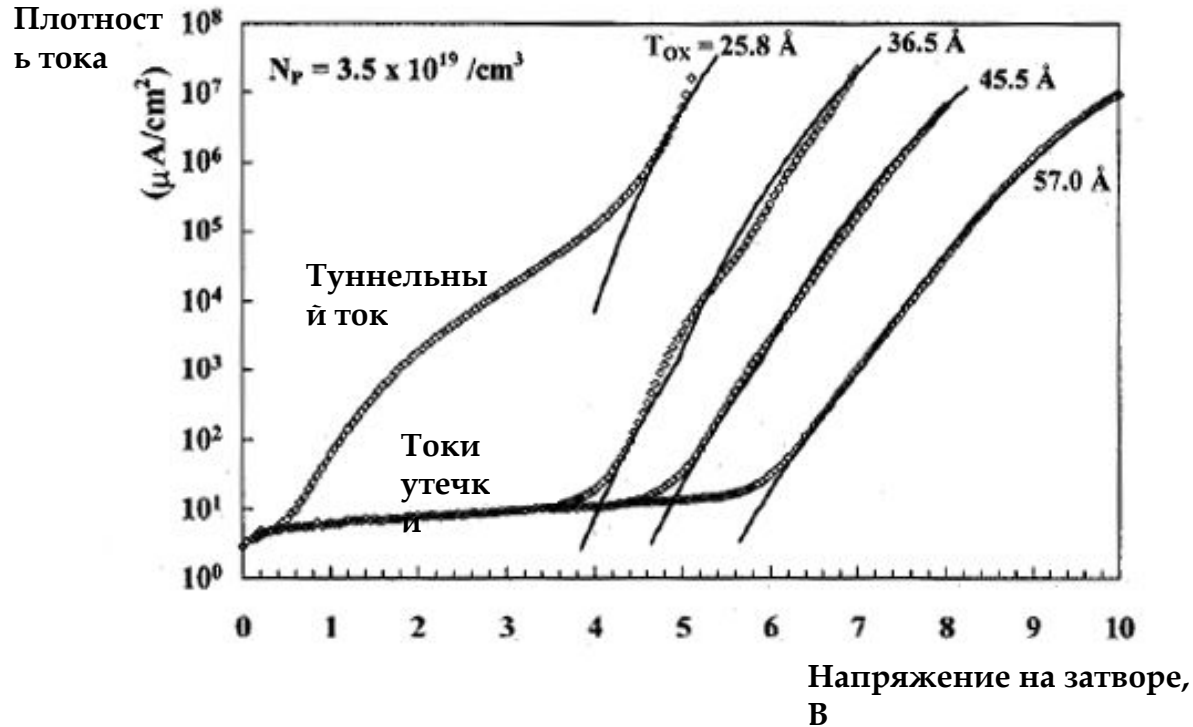
Подпороговый ток

Ток через диэлектрик

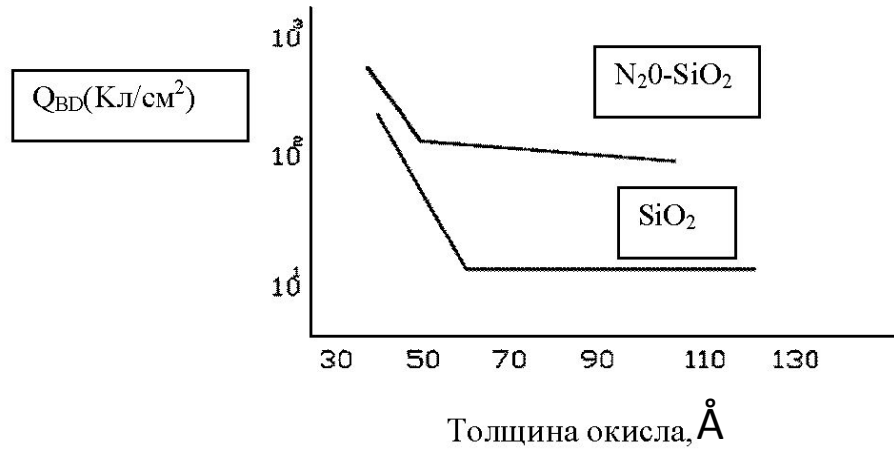
Технологические поколения

к

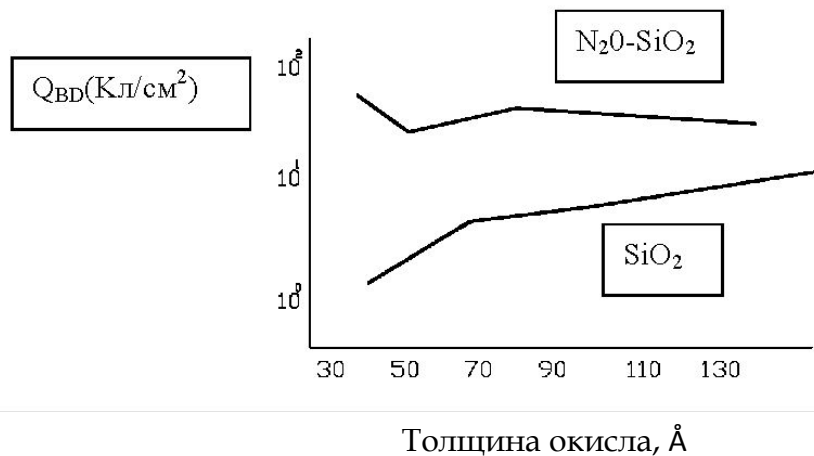
# Токи через диэлектрик



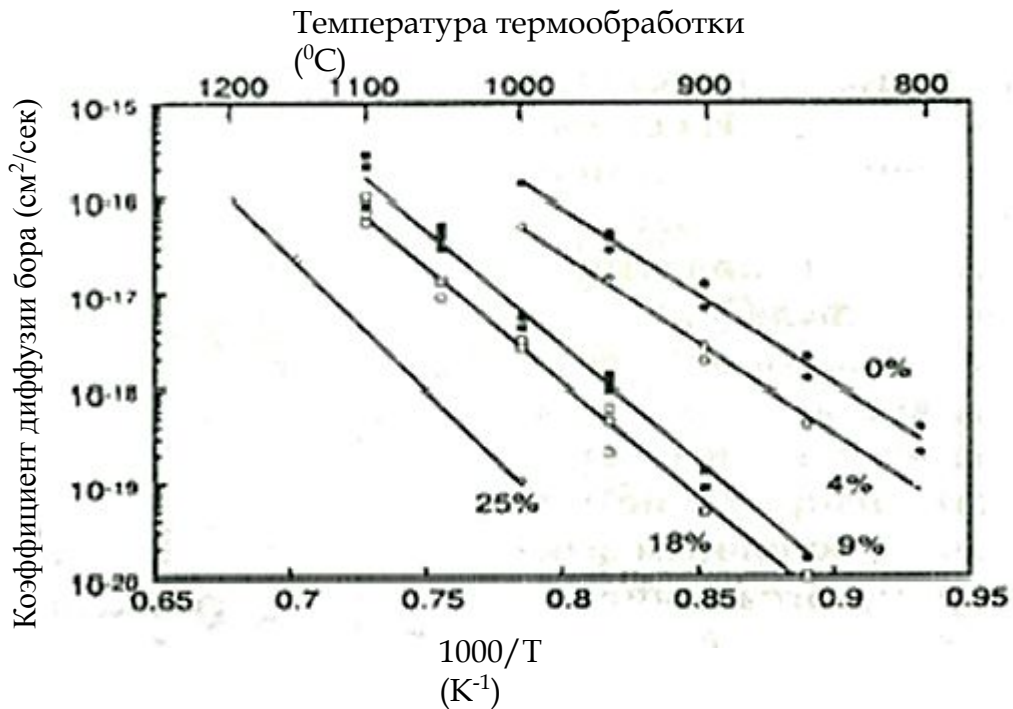
# Влияние азота в окисле на накопленный заряд при положительном смещении



# Влияние азота в окисле на накопленный заряд при отрицательном смещении

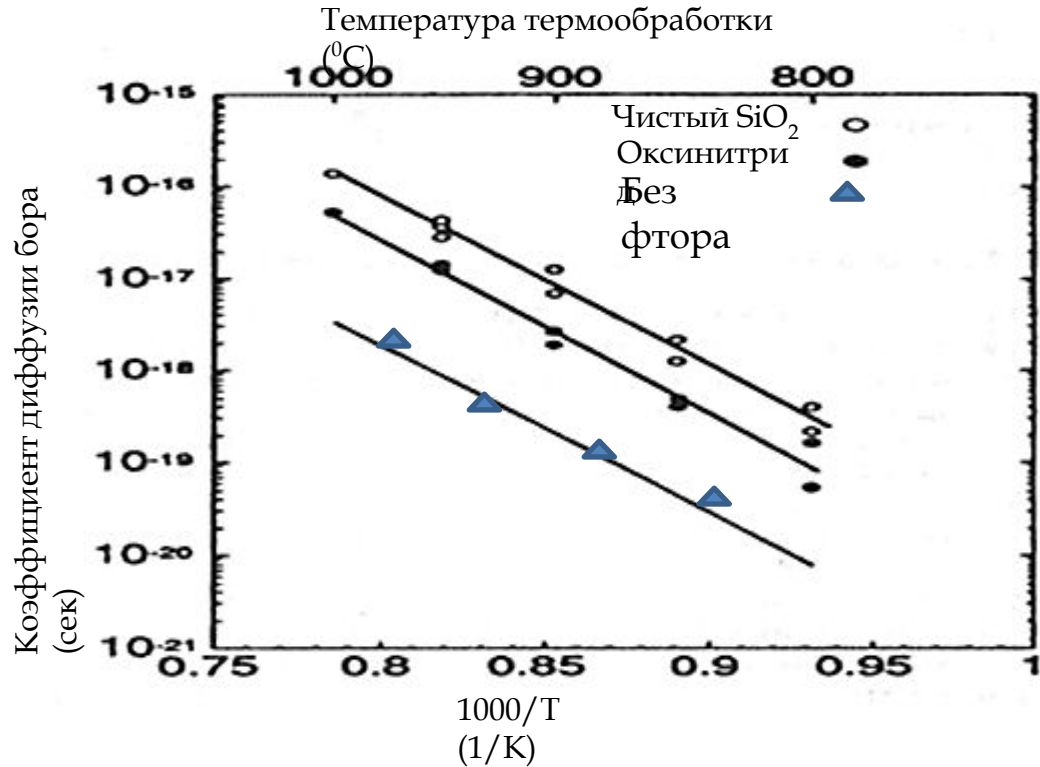


# Влияние азота в окисле на диффузию бора в диэлектрике



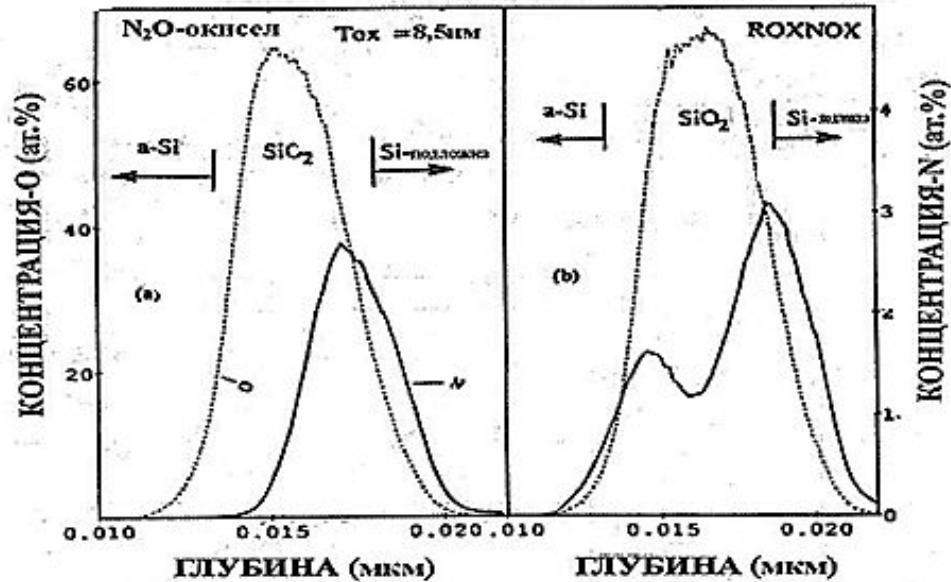
[ 3 ]

# Влияние фтора на диффузию бора в диэлектрике

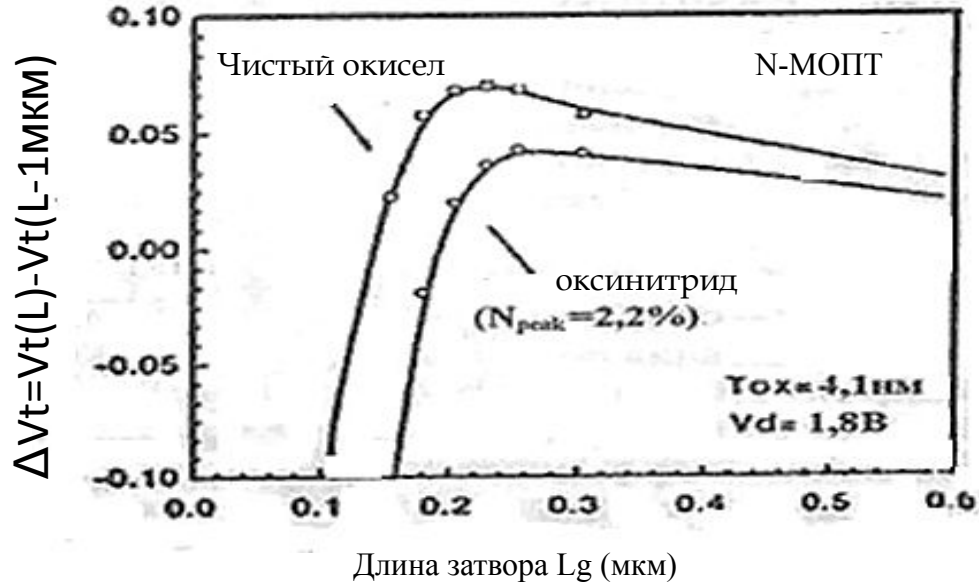


[ 3 ]

# Распределение азота и кислорода в окисле при нитридизации в $N_2O$ и $NH_3$ с реокислением

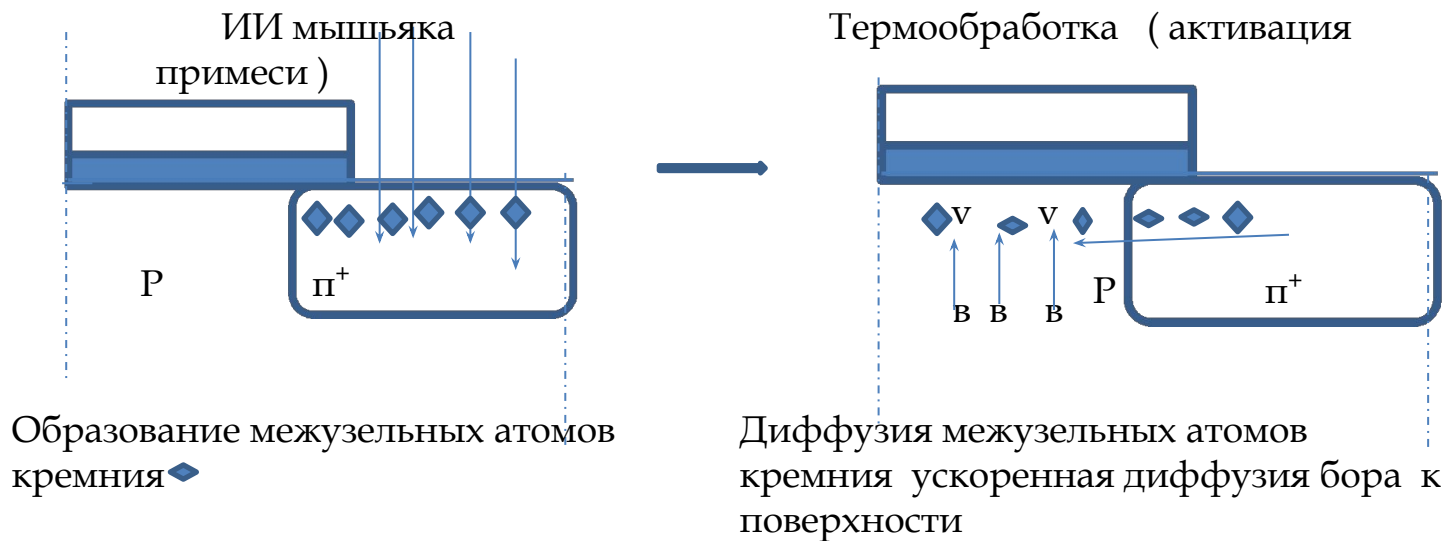


# Влияние азота в окисле на короткоканальные эффекты

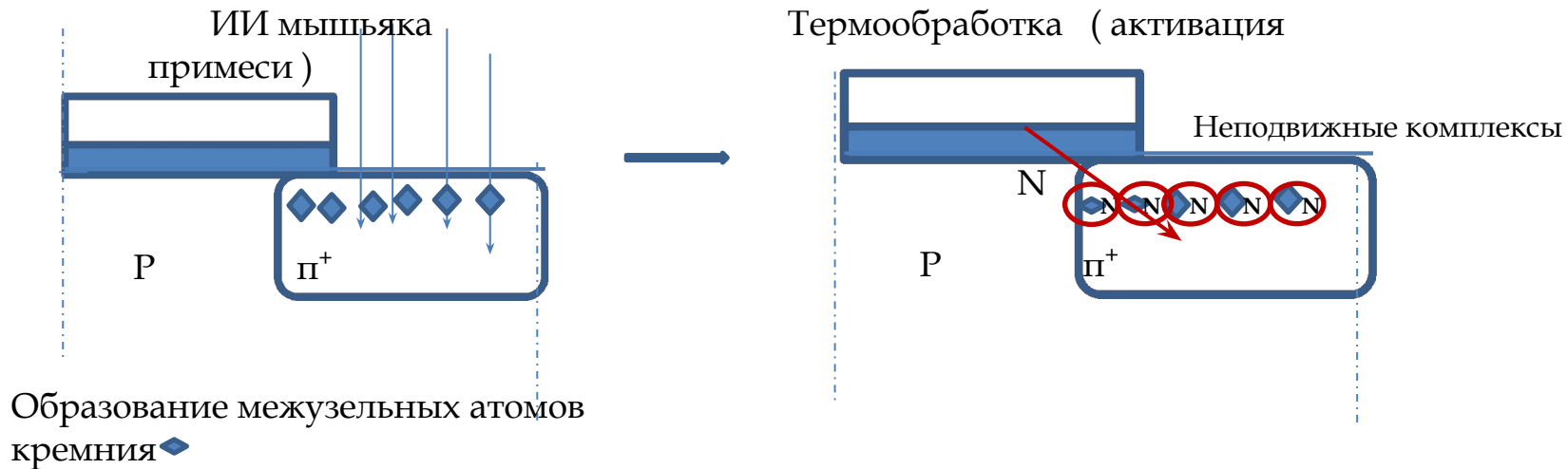




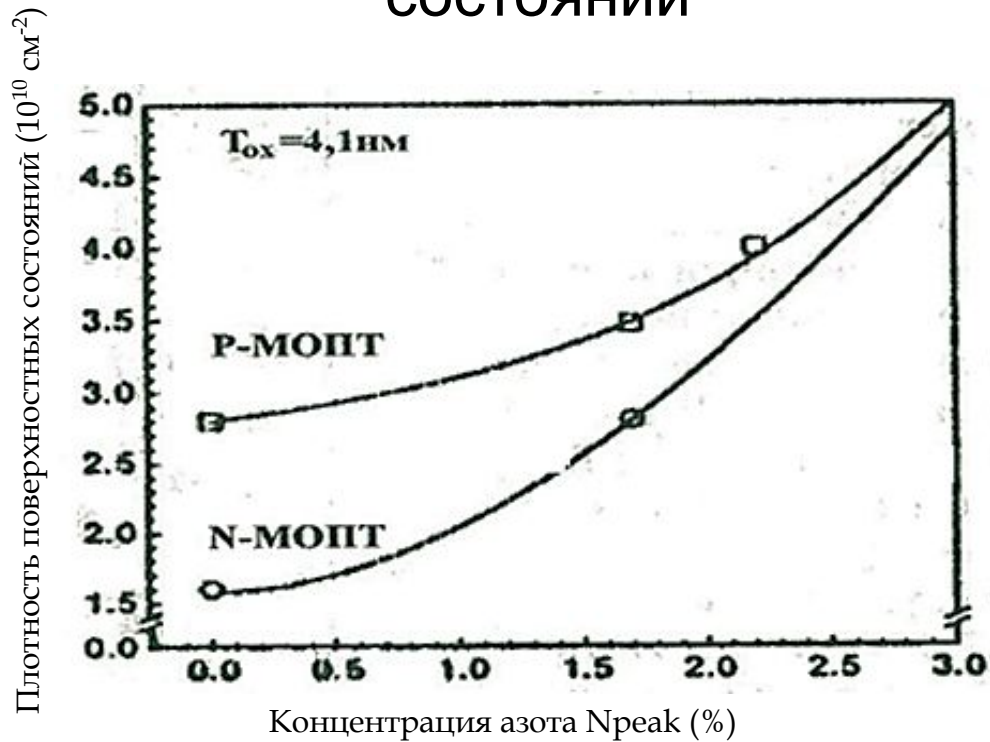
# Причина возникновения обратного короткоканального эффекта



# Причина подавления обратного короткоканального эффекта азотом

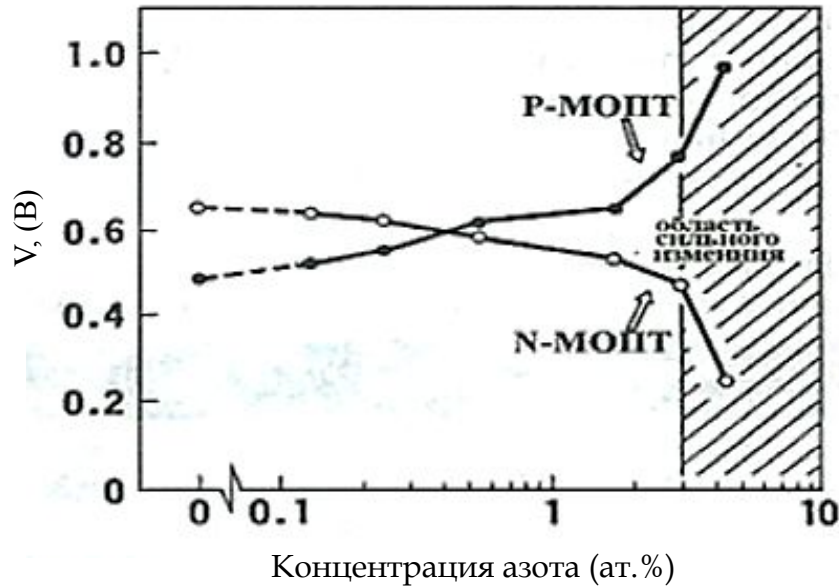


# Влияние азота в окисле на плотность поверхностных состояний



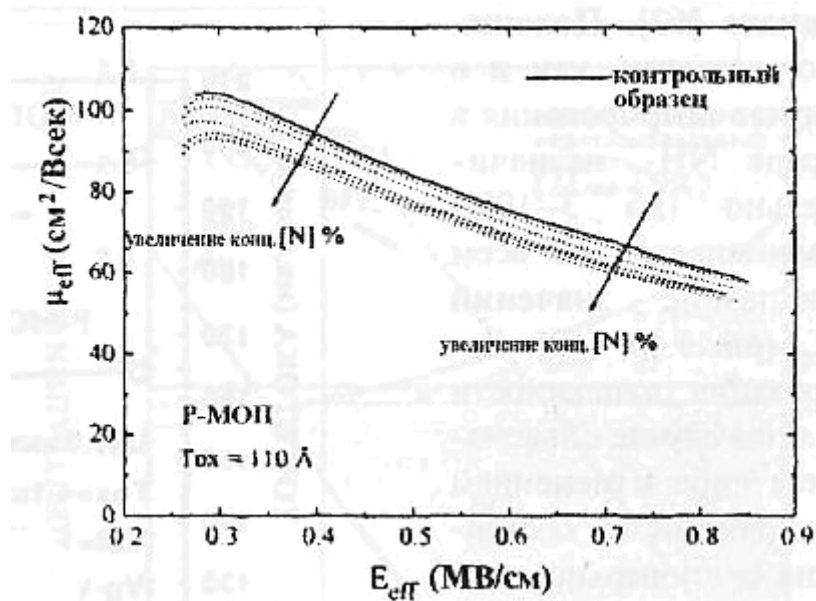
[ 3 ]

# Влияние азота в окисле на пороговые напряжения МОПТ

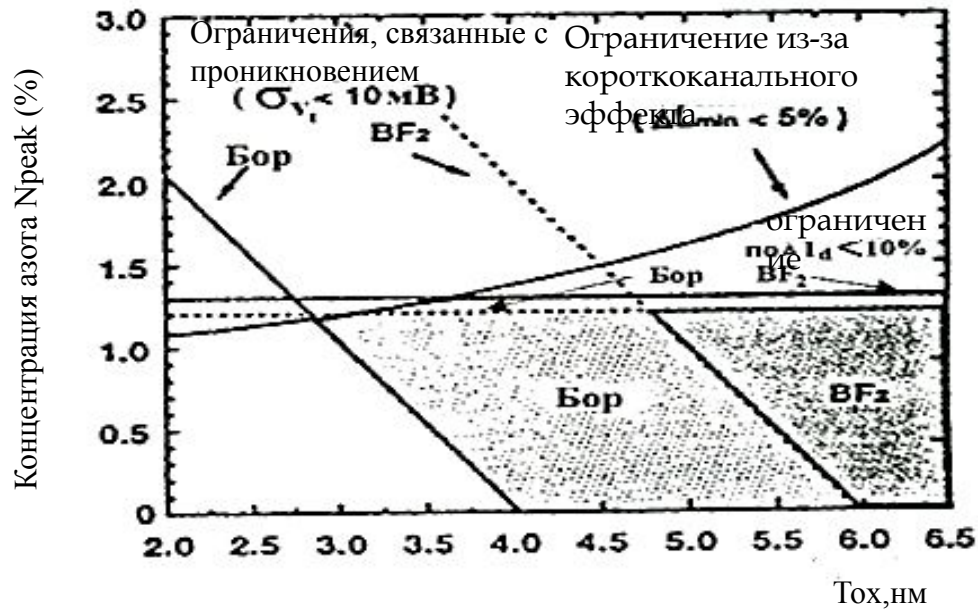


[ 3 ]

# Зависимость подвижности электронов от концентрации азота в окисле



# Оптимизация процесса нитридации окисла по предельно допустимой концентрации азота



[ 3 ]