

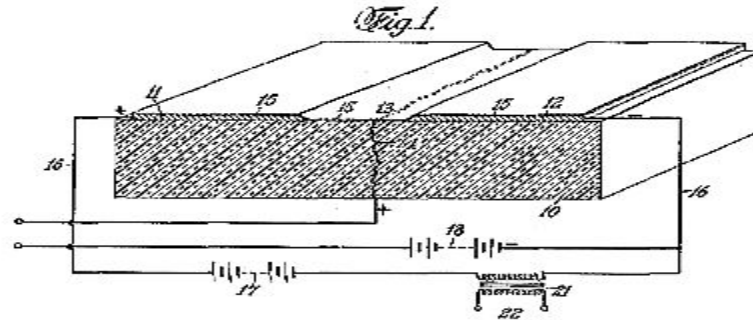
Лекция 6

Формирование подзатворного диэлектрика



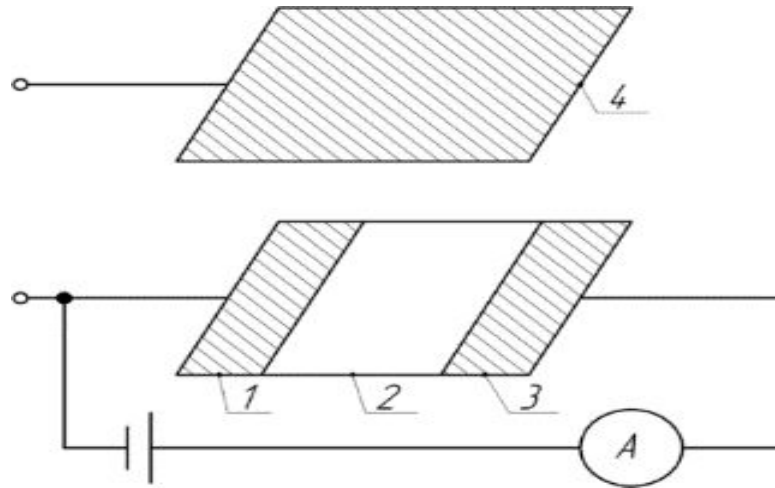
Нереализованный «полевой транзистор» Лиленфельда.

Jan. 28, 1930. J. E. LILIENTELD 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

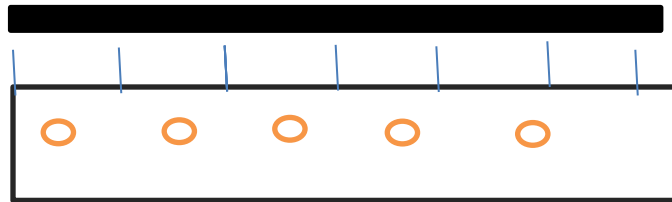
Принцип работы полевого транзистора



Почему не работал МДП-транзистор

-
-

Управляющий электрод



Ловушки - 10^{14}см^{-2}
Носители - 10^{12}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

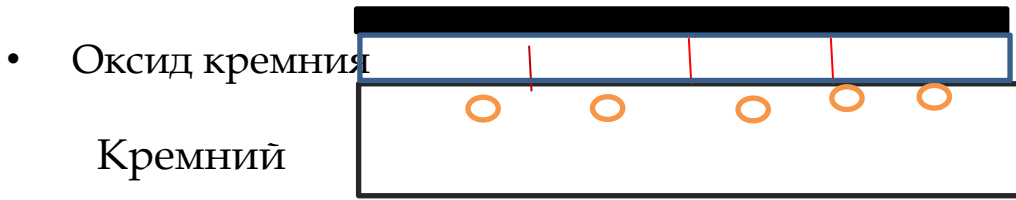
М.Аталла
М.Кант



Почему стал работать МОП-транзистор

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

Управляющий электрод



Ловушки - 10^{11}см^{-2}

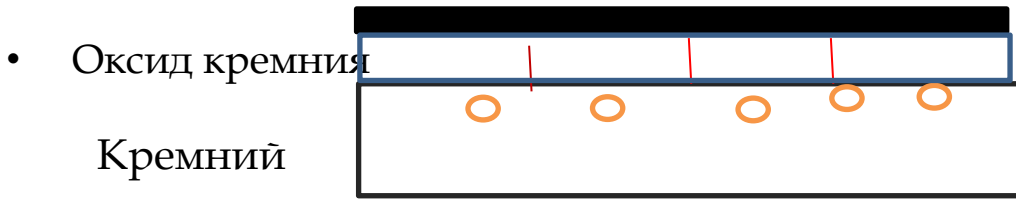
Носители - 10^{12}см^{-2}

- 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

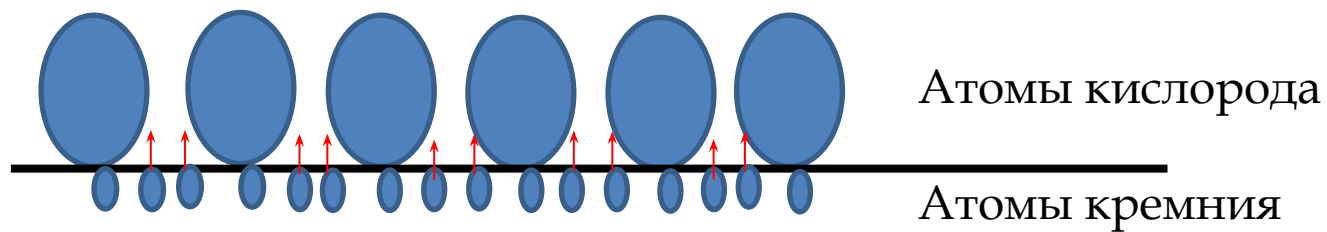


Ловушки - 10^{11}см^{-2}

Носители - 10^{12}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

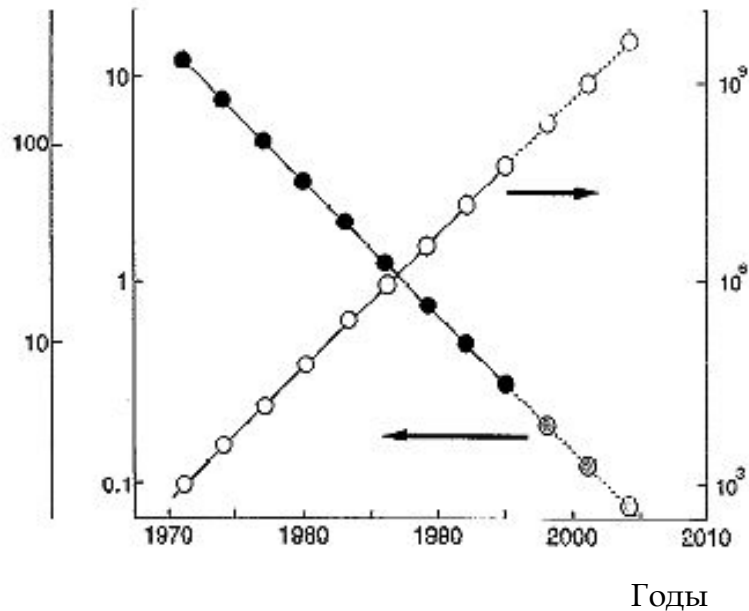


Динамика изменения толщины подзатворного окисла

Толщина окисла (нм)

Минимальный размер (мкм)

Степень интеграции

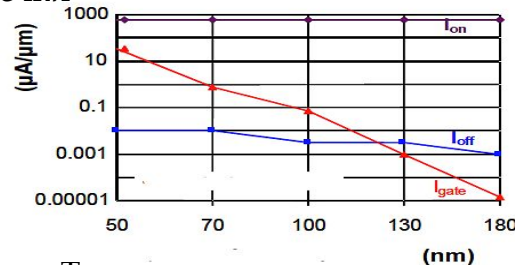


[1]

Проблемы подзатворного диэлектрика



Токи утечки



Ток насыщения

Подпороговый ток

Ток через диэлектрик

Технологические поколения

к

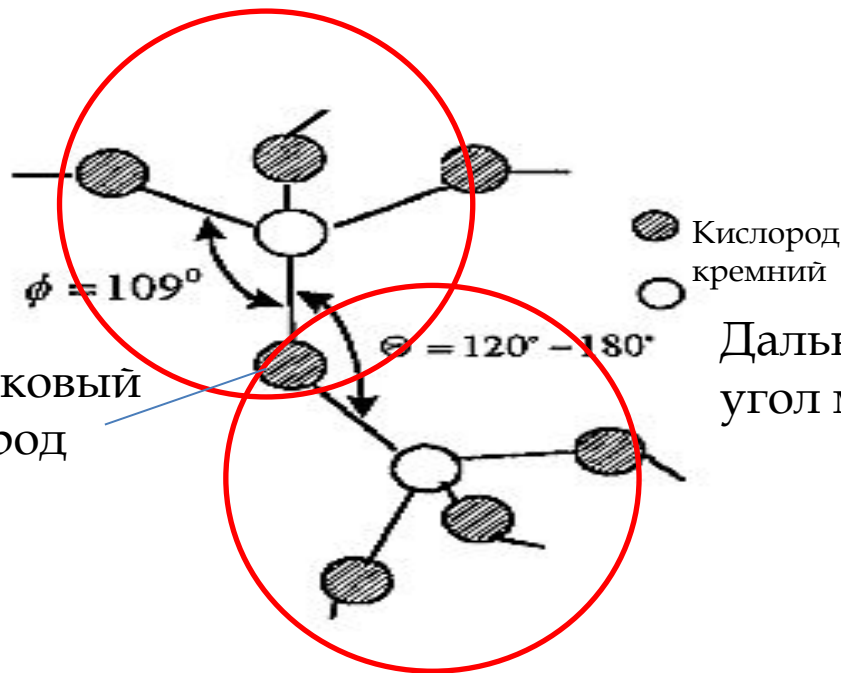
[1]



Структура оксида кремния

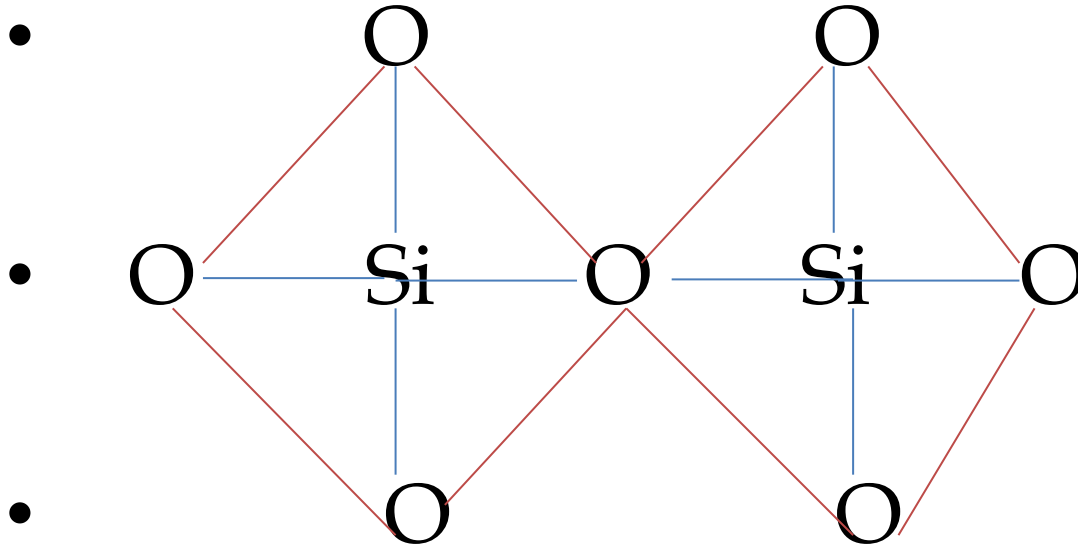
Ближний
порядок
(тетраэдр)

Мостиковый
кислород



Дальний порядок (
угол между связями)

Ближний порядок



Расстояние между атомами в тетраэдре

Si - O 1,69 Å

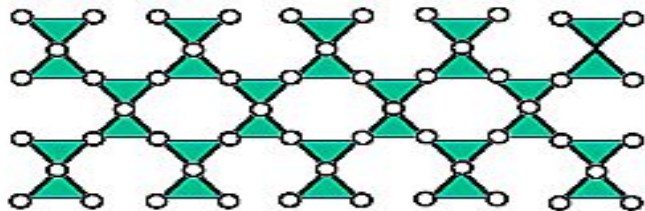
50% -
ковалентная
50% - ионная

O - O 2,65 Å

Si - Si 3,0 Å

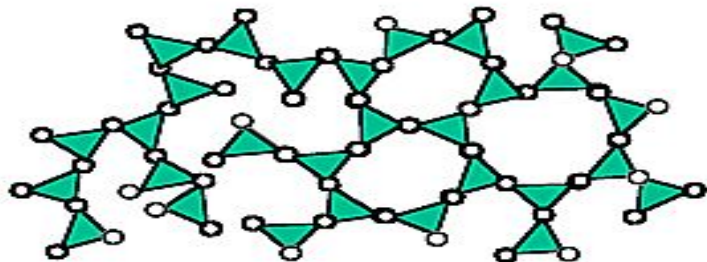
Структура оксида кремния

Дальний
порядок
Ближний
порядок



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

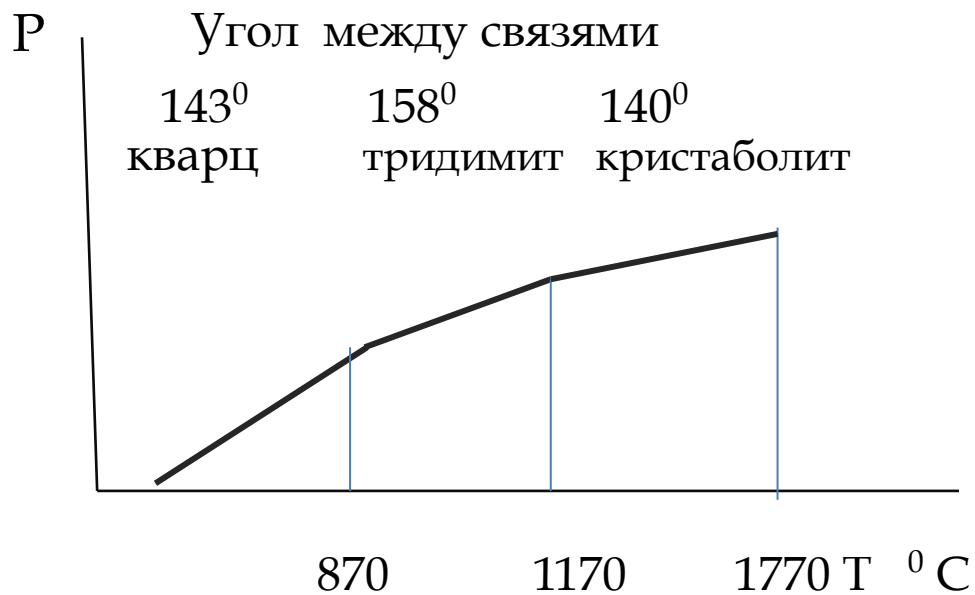
Только
ближний
порядок



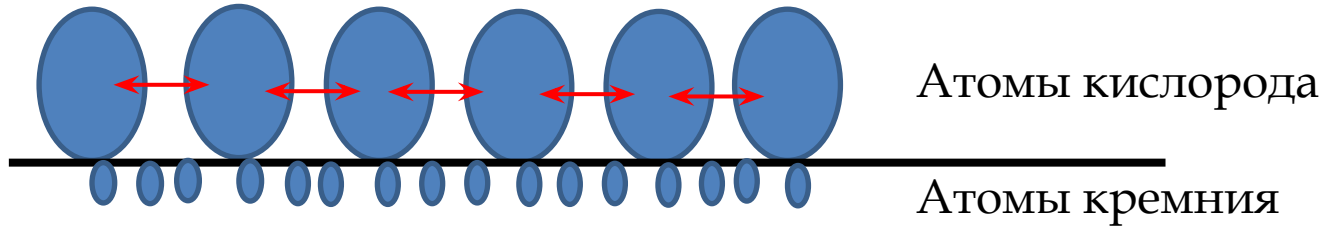
Аморфное
состояние
($d = 2,2 \text{ г/см}^3$)

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

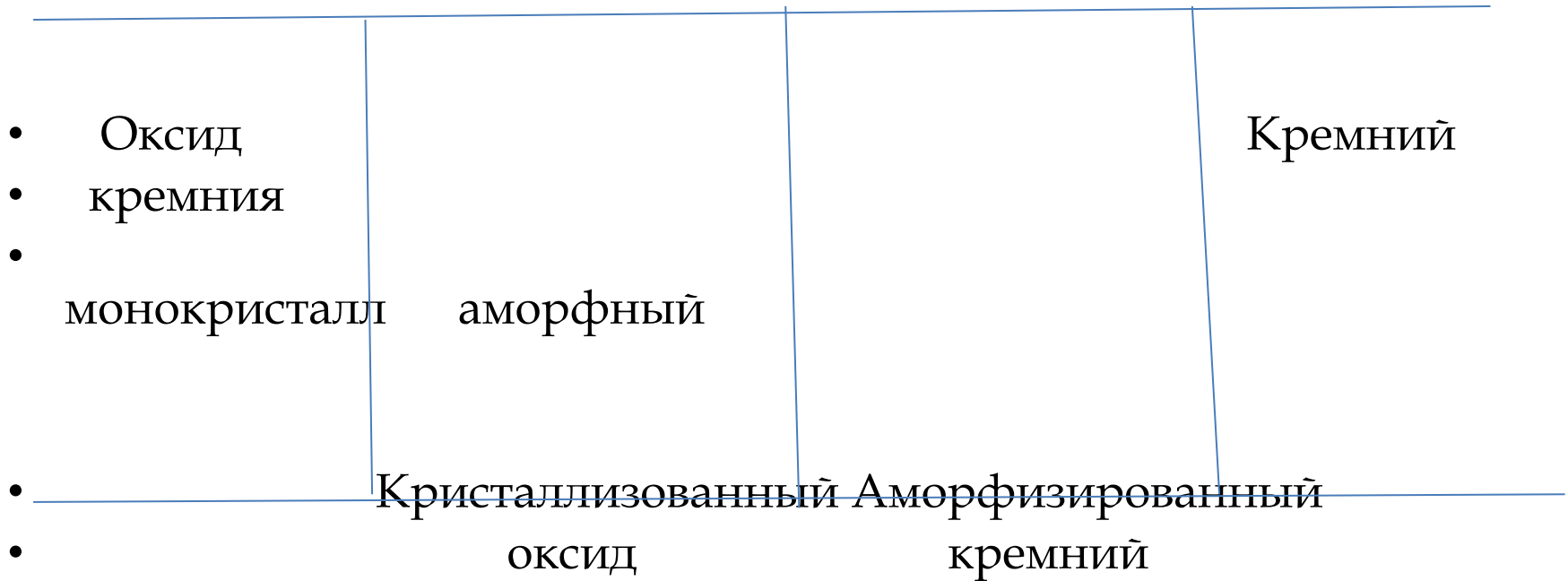
Факторы способствующие локальной кристаллизации аморфного оксида кремния

- 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

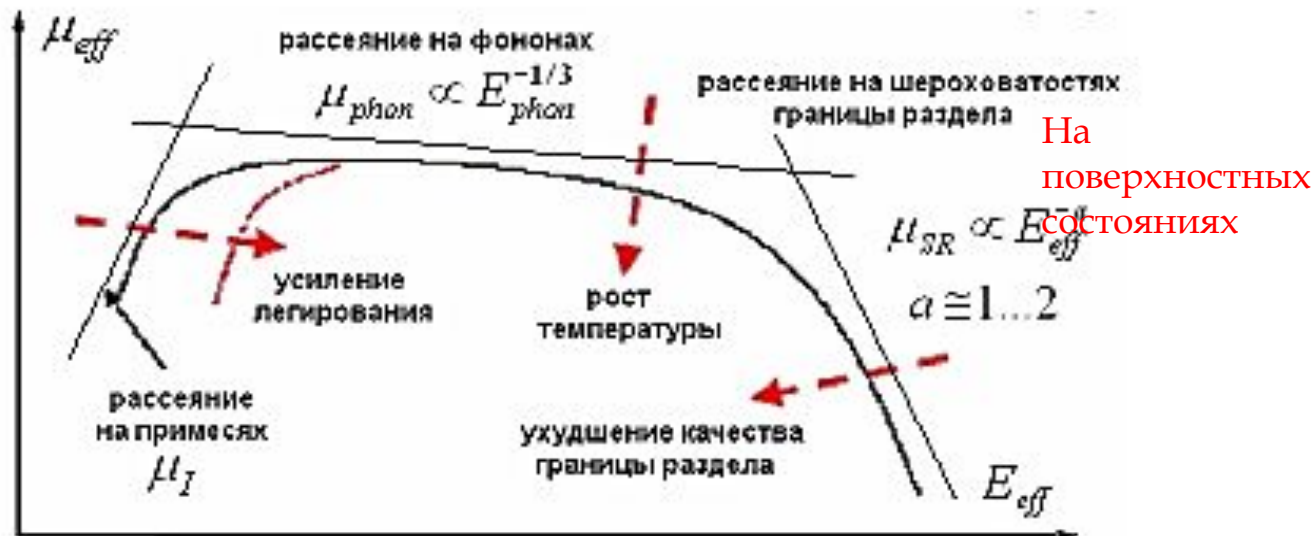


- **Зарядовое состояние системы**
- **кремний-оксид**

Пороговое напряжение МОП-транзистора

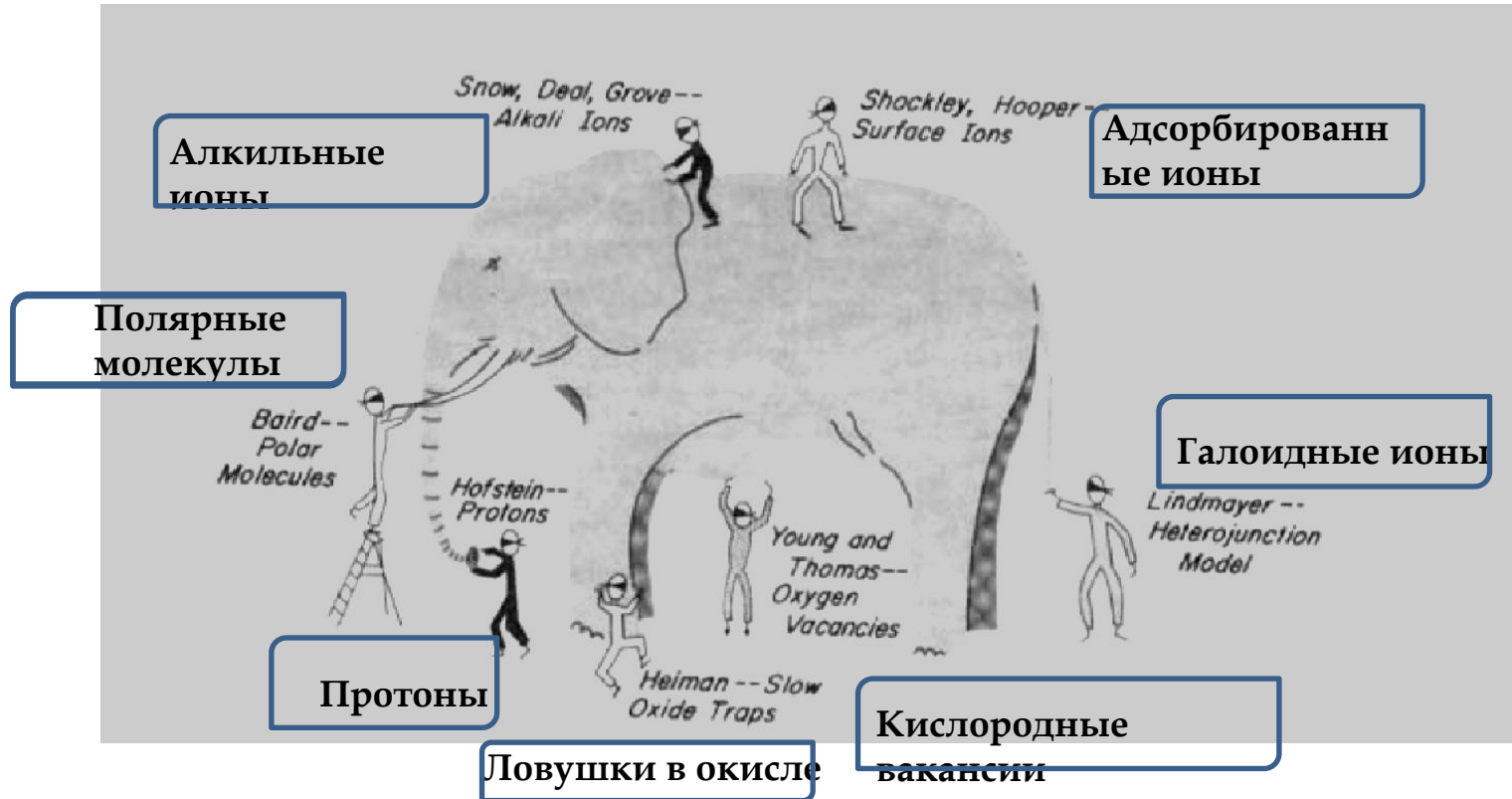


Зависимость подвижности носителей от температуры и электрического поля

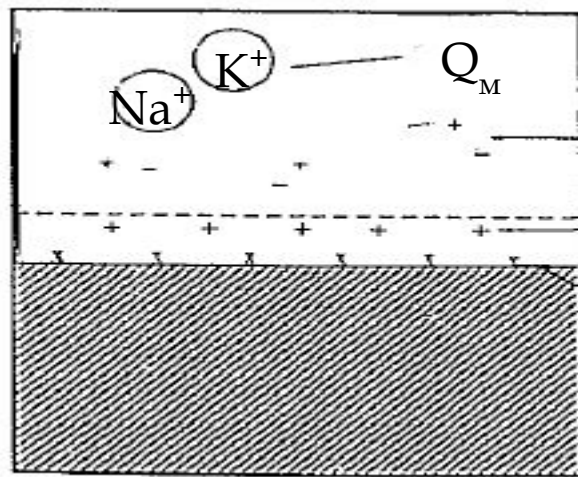


Зарядовое состояние системы кремний-оксид

Слон и семеро слепцов Р.Донована



Заряды в системе кремний-оксид кремния



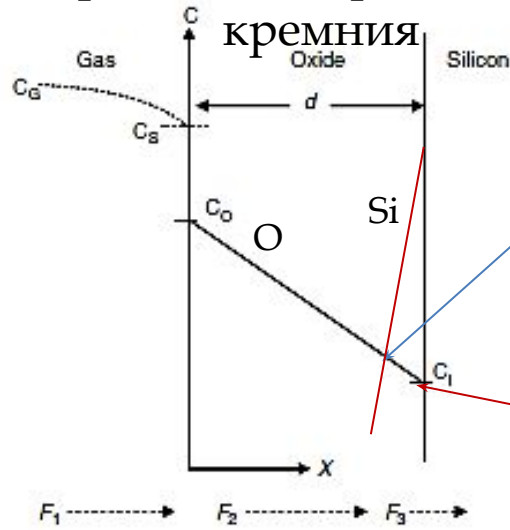
- Q_M Мигрирующий заряд
- Q_r Радиационный заряд
- Q_{II} Постоянный заряд
- $Q_{ПС}$ Заряд поверхностных состояний

Постоянный заряд

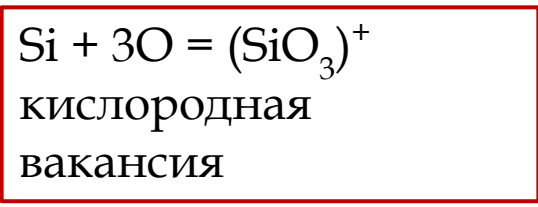
- Расположен в оксиде вблизи поверхности кремния (20 A^0)
 - Всегда положительный
 - Не зависит от типа проводимости и концентрации примеси в кремнии
 - Большой при ориентации поверхности кремния (111)
 - Не меняется под воздействием внешних электрических полей
 - Уменьшается при увеличении температуры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

Образование кислородных вакансий

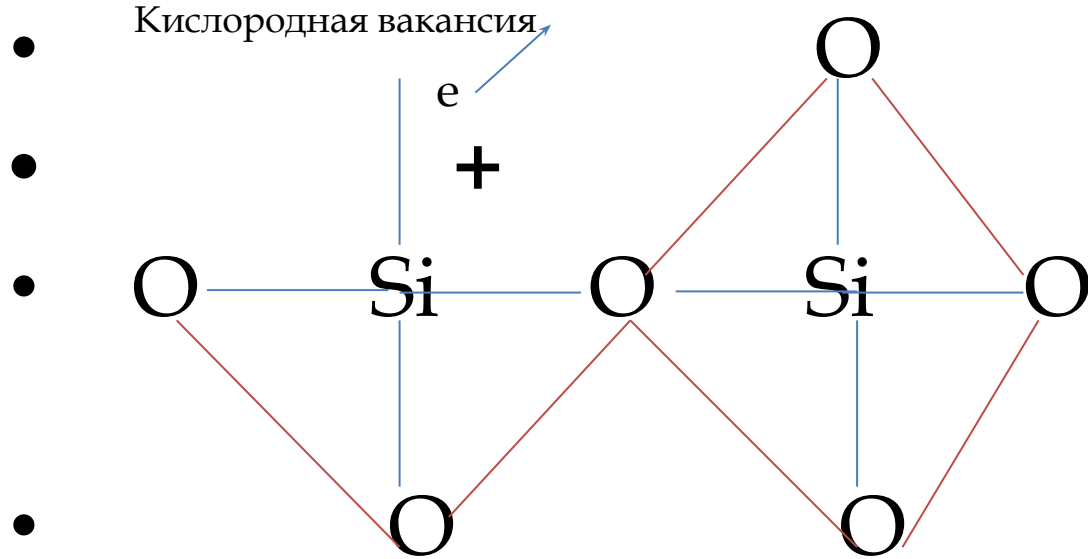
Адсорбция диффузия химическая реакция
кислорода кислорода и
кремния



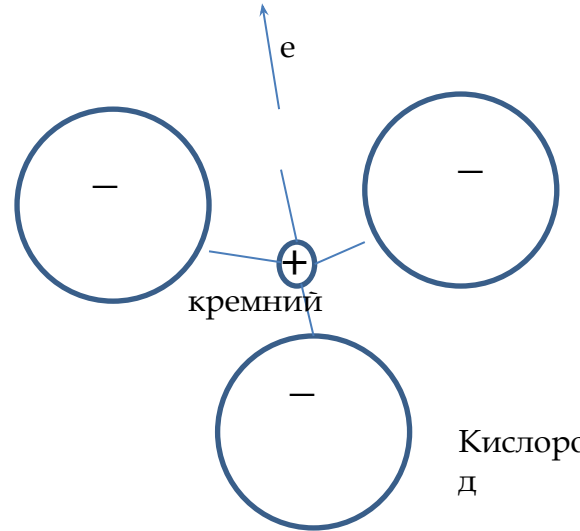
тетраэдр



Постоянный заряд



Почему кислородная вакансия донор

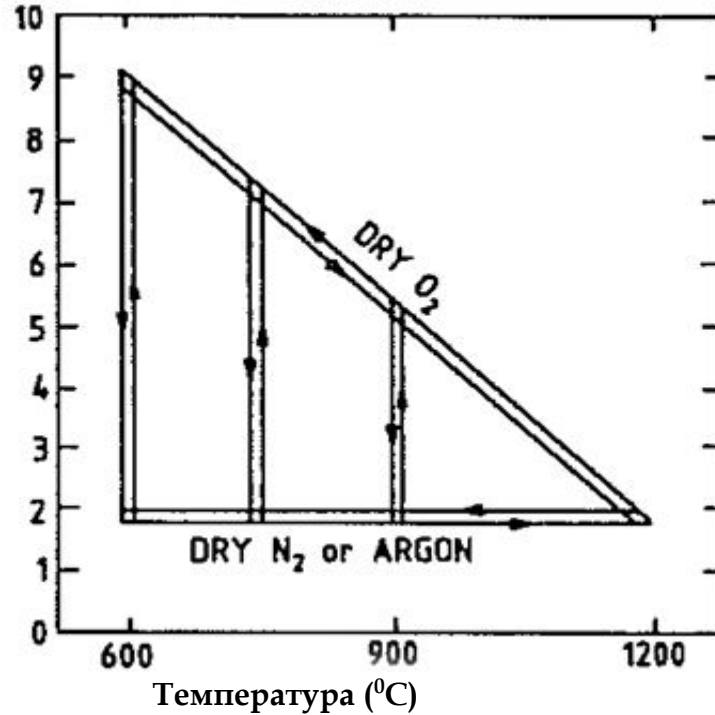


Связь кислород-кремний

50% - ионная,
50% ковалентная

Треугольник Дилла

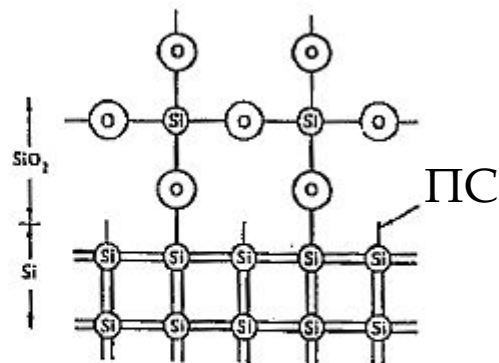
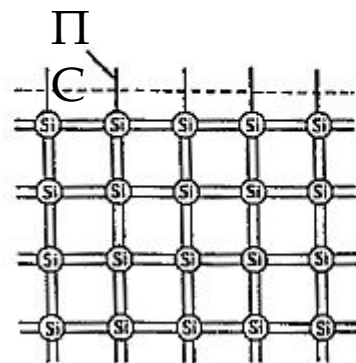
Фиксированный заряд $Q, Jq (10^{11} \text{ см}^{-2})$



[2]



Поверхностные состояния в системе кремний-оксид



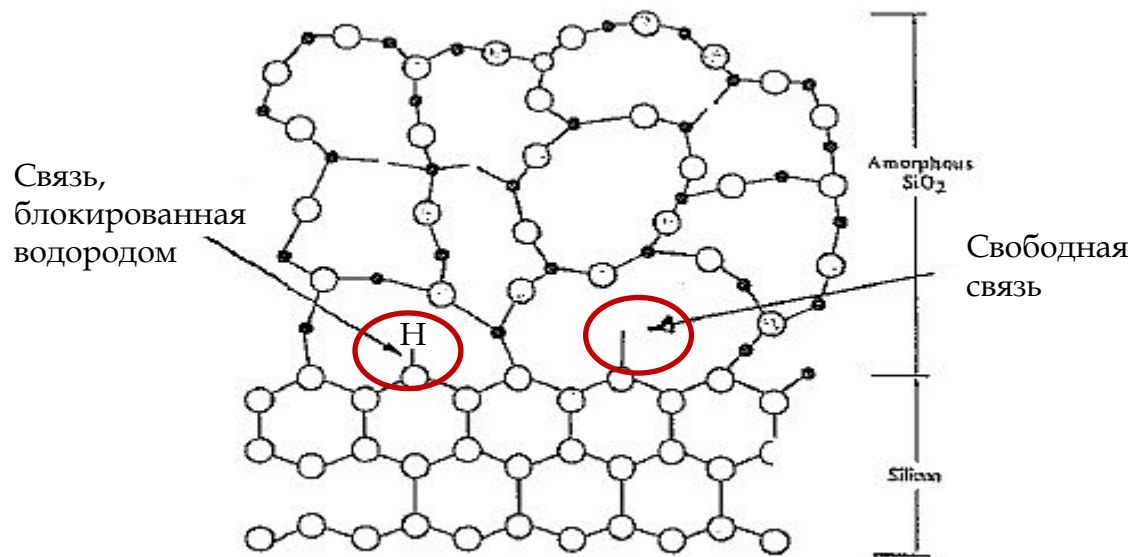
[2]



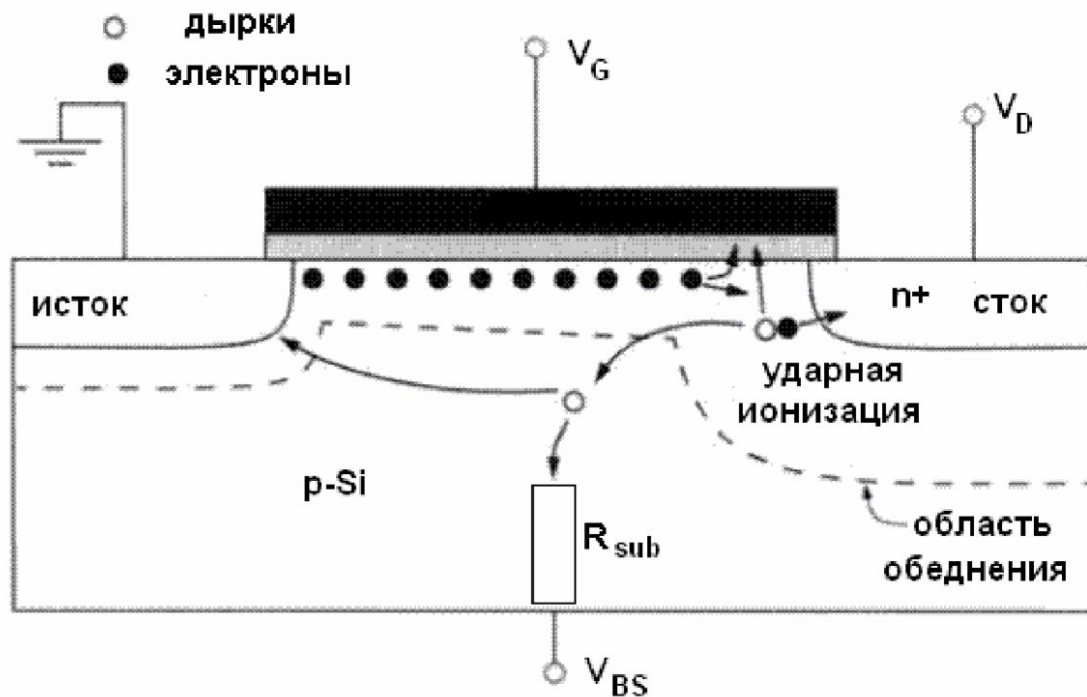
Поверхностные состояния

- 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

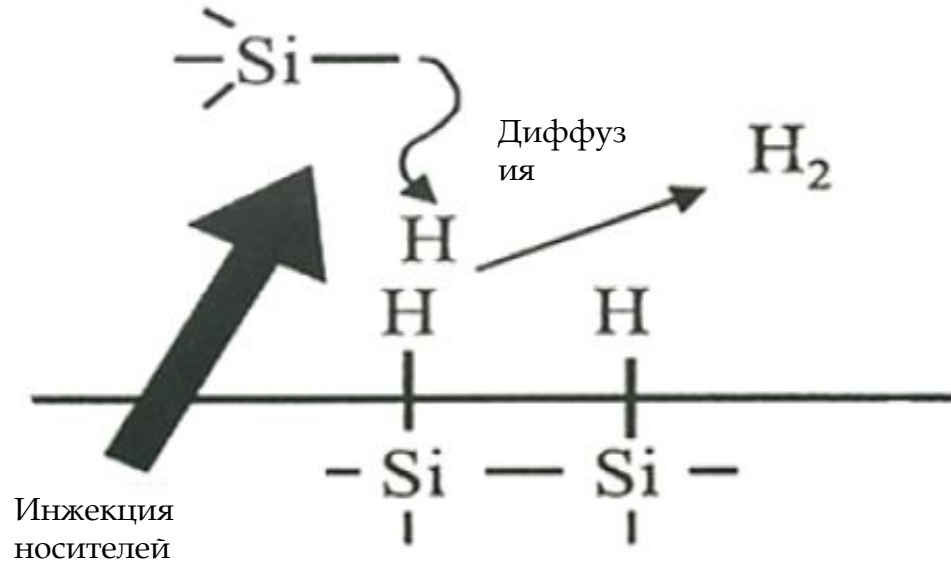


Эффект образования горячих носителей



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

•



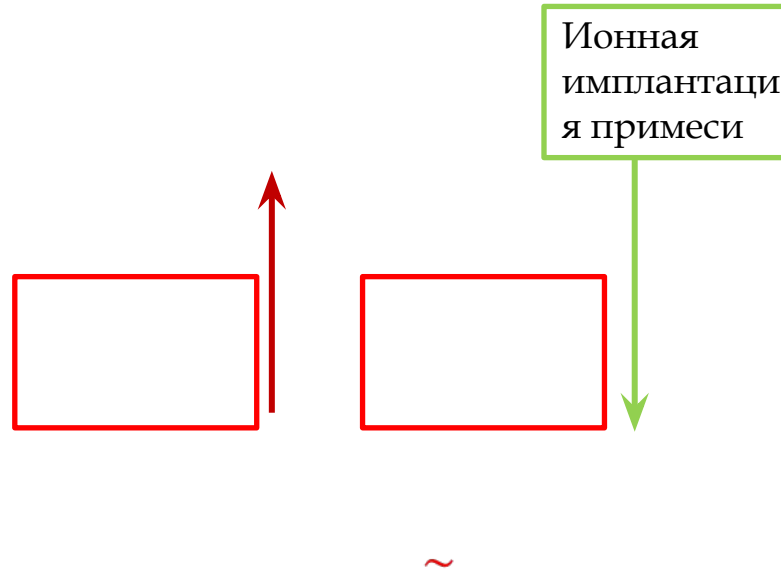
Мигрирующий заряд

- Расположен в объеме оксида
- Чаще положительный (Na^+ , K^+ , 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

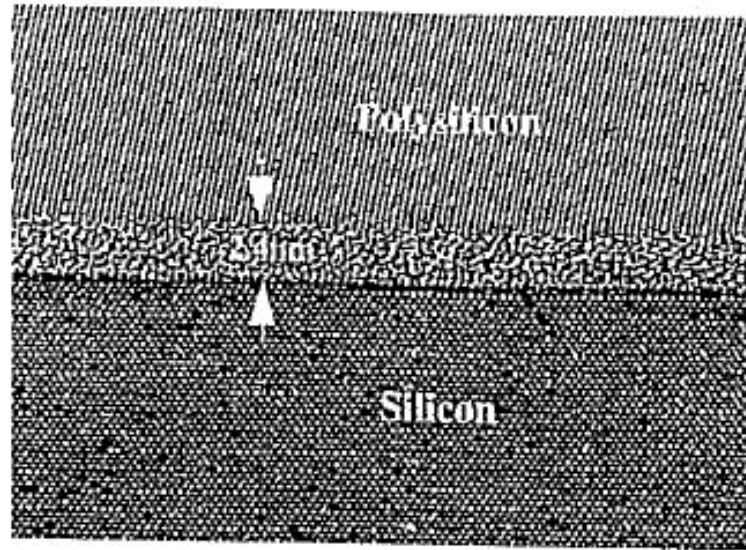
Компонент заряда в системе кремний-оксид	На какой параметр МОПТ влияет	Оптимальная температура окисления	Оптимальная среда процесса окисления
Постоянный заряд	Величина порогового напряжения МОПТ	Высокая	Сухой кислород
Поверхностные состояния	Подвижность носителей в канале МОПТ	Низкая	В парах воды

Пороговое напряжение МОП-транзистора



Режим окисления: 800⁰С, пары воды (пирогенное окисление)

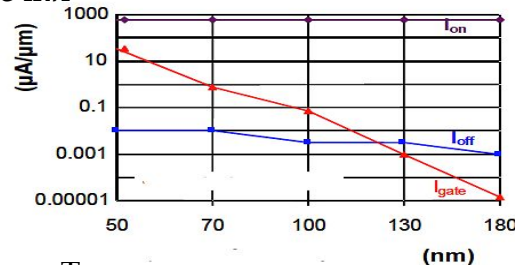
Микрофотография МОП структуры



Проблемы подзатворного диэлектрика



Токи утечки



Ток насыщения

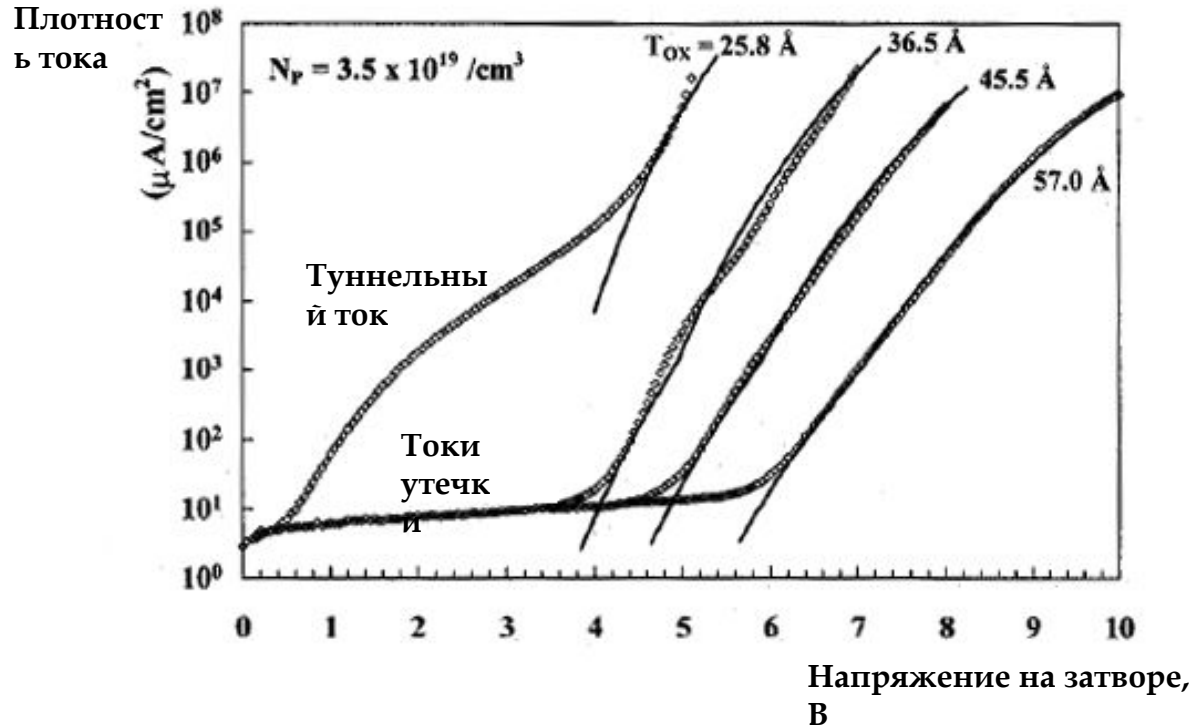
Подпороговый ток

Ток через диэлектрик

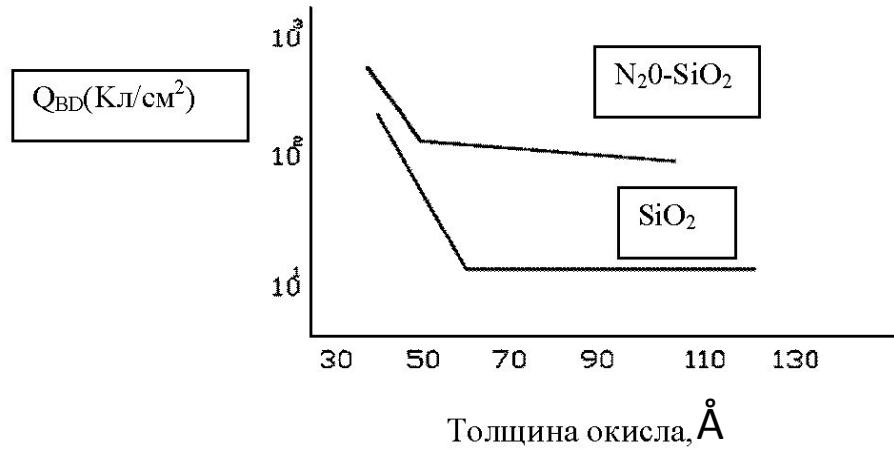
Технологические поколения

к

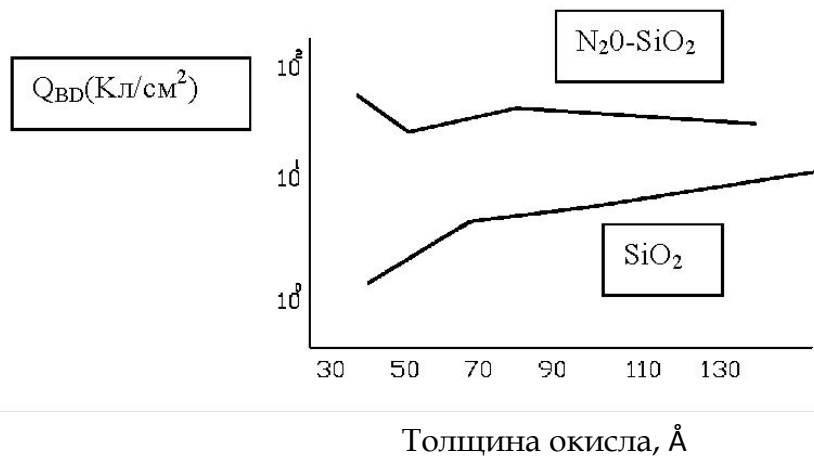
Токи через диэлектрик



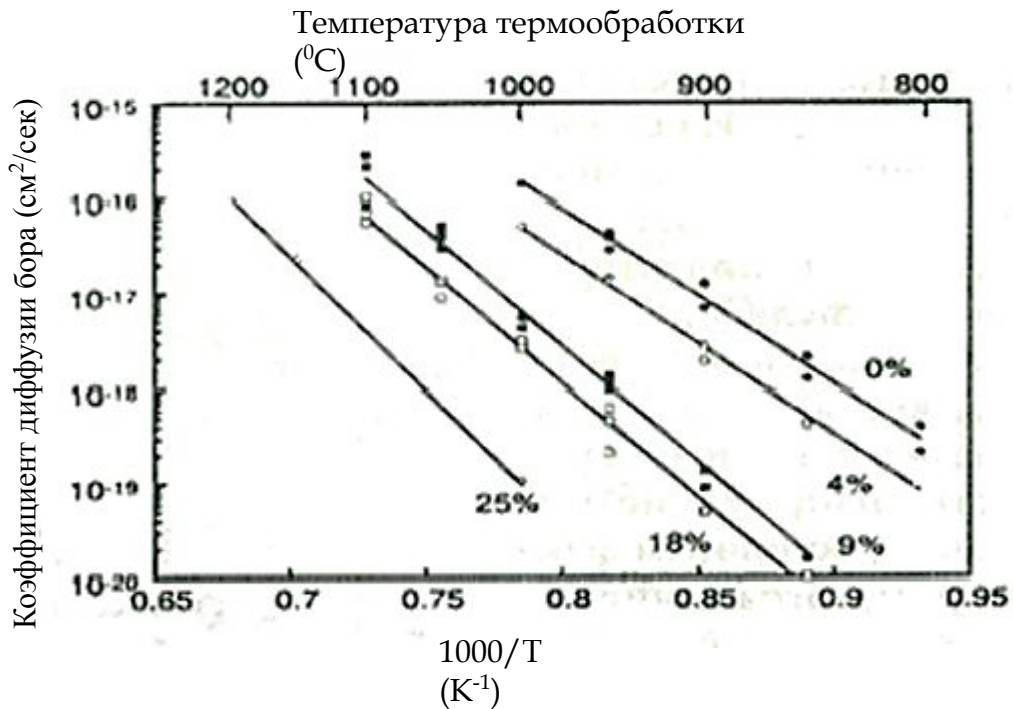
Влияние азота в окисле на накопленный заряд при положительном смещении



Влияние азота в окисле на накопленный заряд при отрицательном смещении

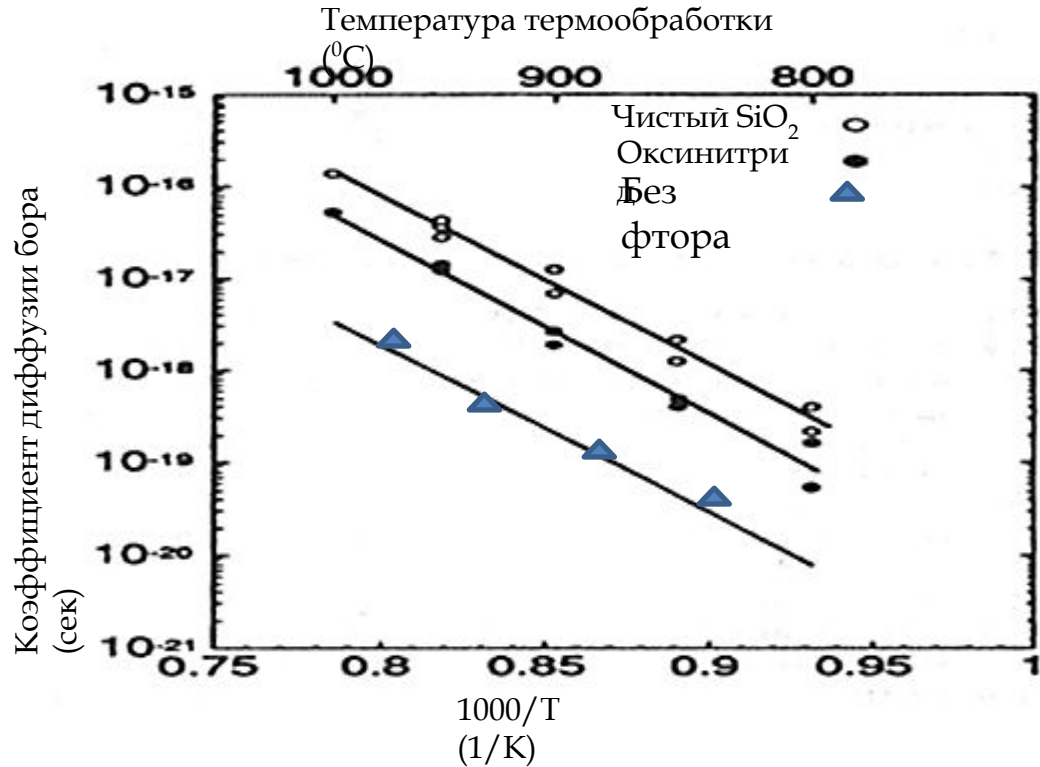


Влияние азота в окисле на диффузию бора в диэлектрике



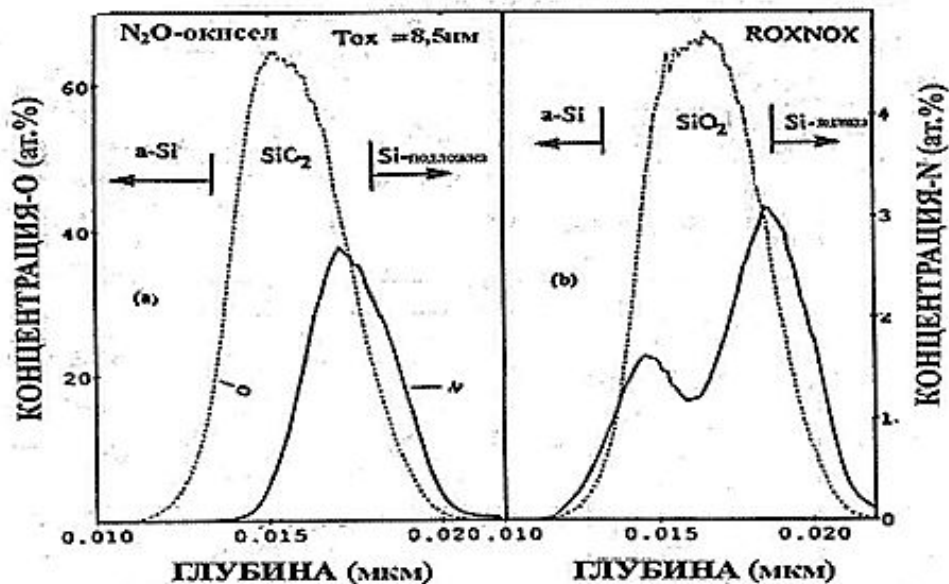
[3]

Влияние фтора на диффузию бора в диэлектрике

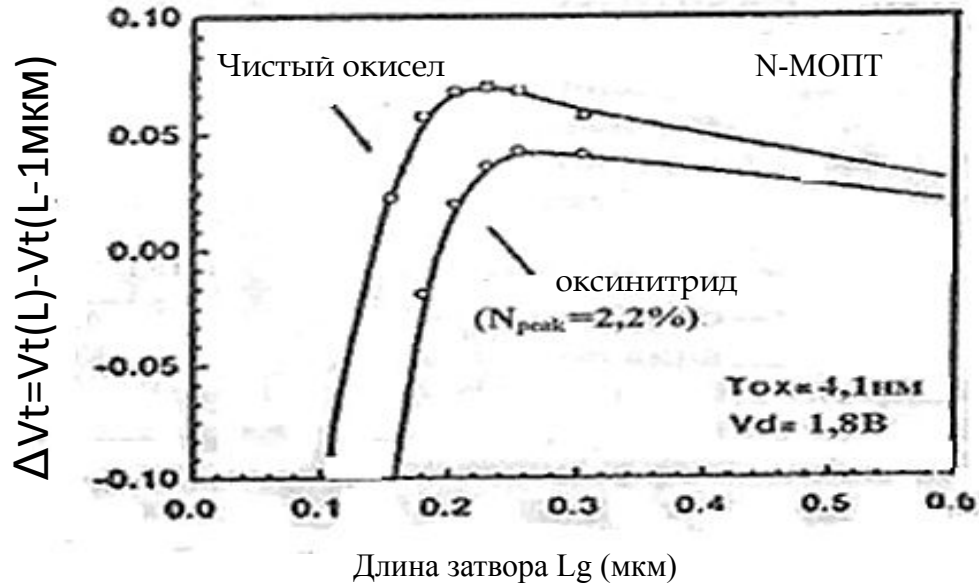


[3]

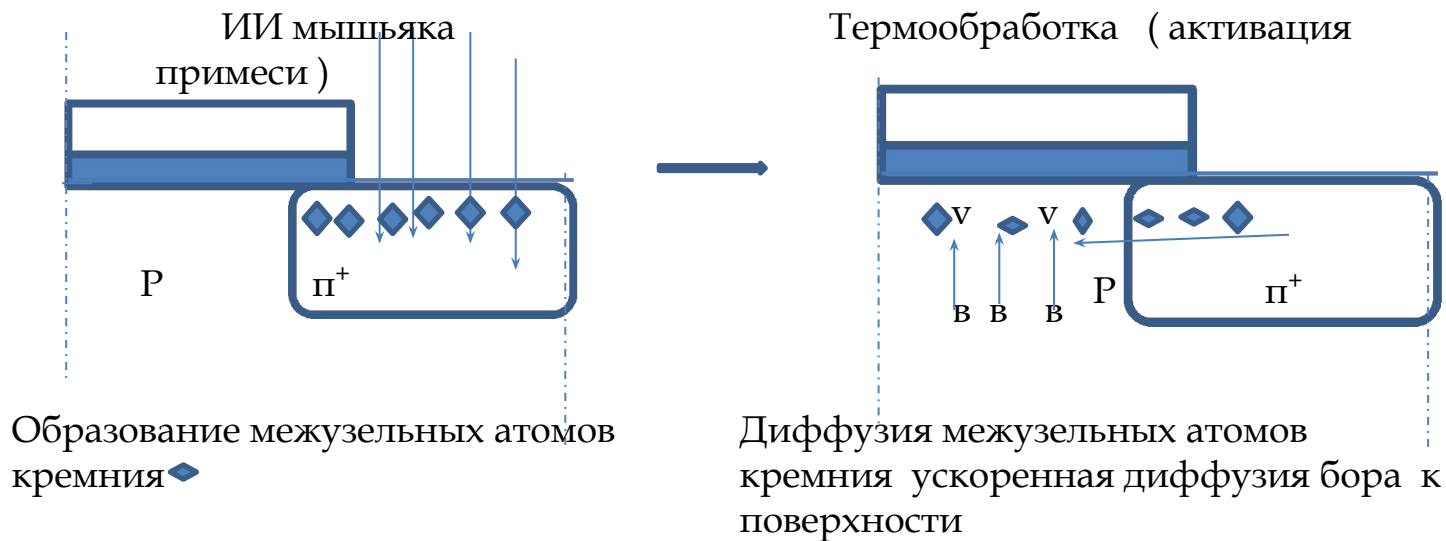
Распределение азота и кислорода в окисле при нитридизации в N_2O и NH_3 с реокислением



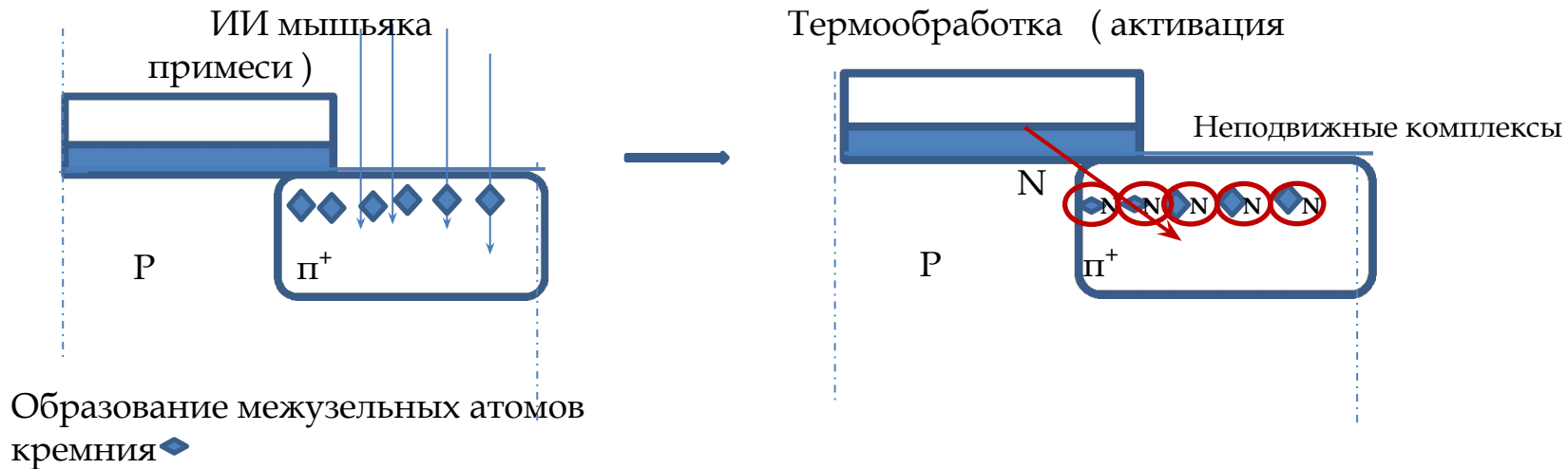
Влияние азота в окисле на короткоканальные эффекты



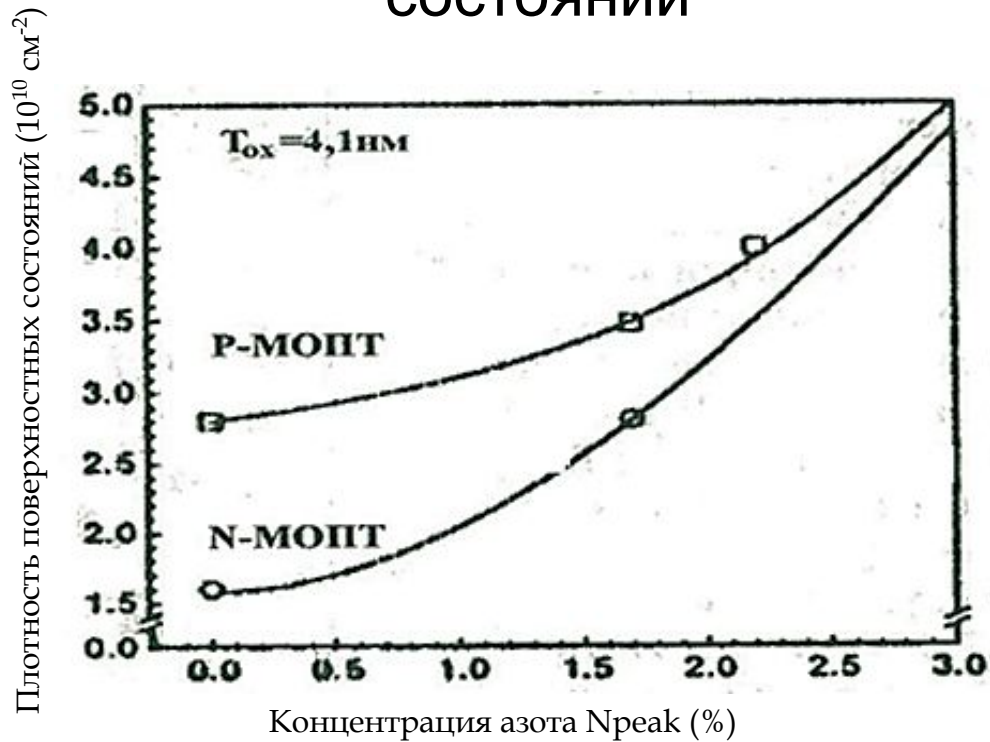
Причина возникновения обратного короткоканального эффекта



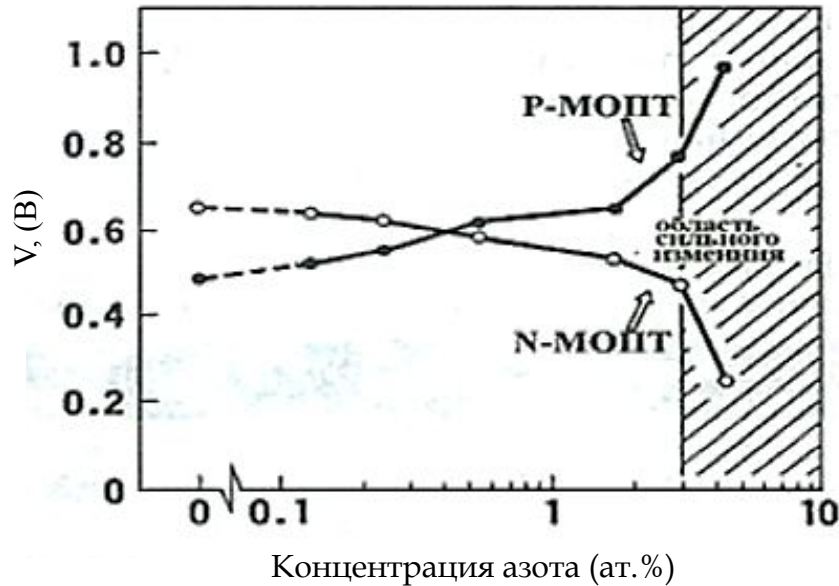
Причина подавления обратного короткоканального эффекта азотом



Влияние азота в окисле на плотность поверхностных состояний

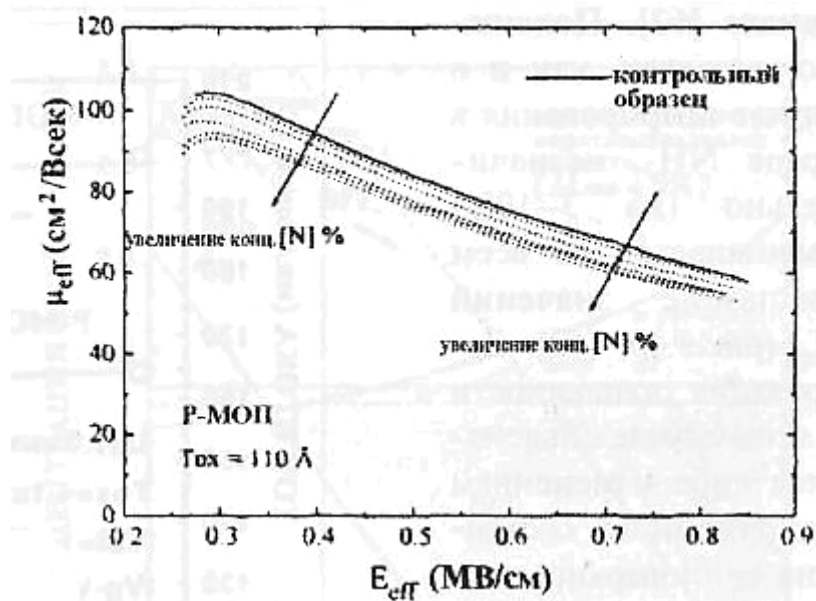


Влияние азота в окисле на пороговые напряжения МОПТ

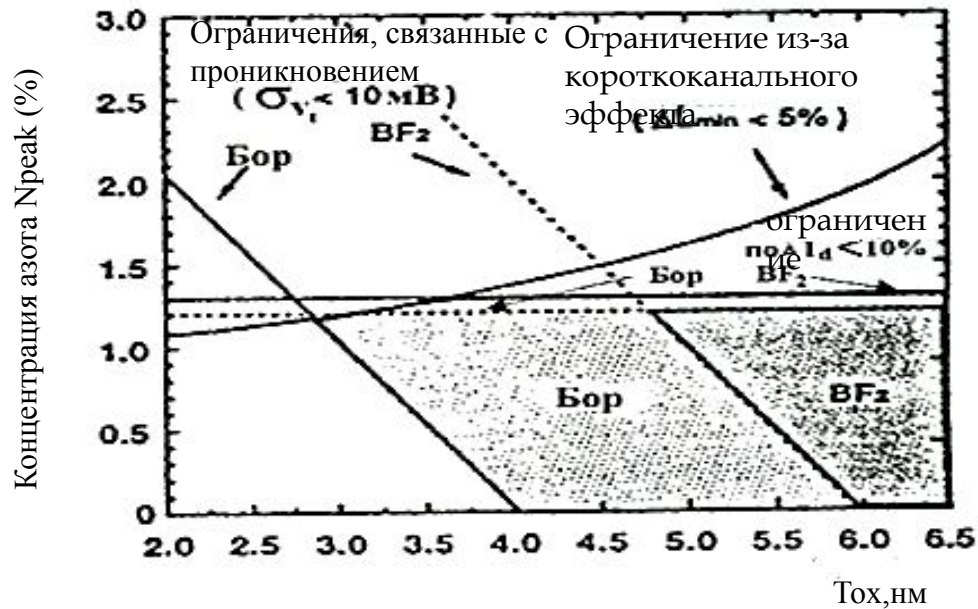


[3]

Зависимость подвижности электронов от концентрации азота в окисле



Оптимизация процесса нитридации окисла по предельно допустимой концентрации азота



[3]