

## ***Введение***

Учебное пособие предназначено студентам, получающим подготовку по направлению «Электроника и микроэлектроника», и по специальностям «Микроэлектроника и полупроводниковые приборы», «Микроэлектроника и твердотельная электроника», «Нанотехнология в электронике», «Нанотехнология», «Вычислительные машины, комплексы и сети»,

Каждое направление науки и техники в своём развитии преодолевает ряд трудностей и противоречий. Анализ их источников и путей преодоления весьма важны для понимания логики развития методов и средств направления, для приобретения навыков анализа и преодоления новых вызовов, для воспитания творческого подхода к преодолению неизбежно возникающих проблем и затруднений. Такой «причинно-исторический» подход к изучению дисциплины способствует систематизации знаний и превращает набор весьма важных частных решений в целенаправленную картину развития, легко понимаемую и усваиваемую.

В особой мере такой подход кажется нам полезным при изучении таких направлений науки и техники, в которых сопрягается высокий динамизм развития с большим разнообразием альтернативных возможностей. Таким направлением является современная микроэлектроника. Опыт её развития может быть весьма ценен для нанотехнологии, в которой «тирания альтернатив и направлений», важность правильных решений и динамизм превосходят свойственные микроэлектронике.

Эволюцию направления можно рассматривать как причинно обусловленную цепь поиска и развития методов и средств, направленных на преодоление разрыва между принципиально достижимыми и практически получаемыми результатами. Весьма важным свойством специалиста является умение «видеть поле», понимать необходимость, целесообразность, направленность, конечную цель решаемой частной задачи, так же как возможности и принципиальные ограничения используемых методов и средств. Поэтому в первой части пособия рассматриваются принципиальные ограничения, которые определяют и направления развития и ограничения реализуемого направления. Основное внимание уделено активным элементам микроэлектроники, аккумулировавшим созданное рядом областей знания и способствовавшим их развитию. Но более важным является то, что культура придания заданным областям материала заданных свойств и управления этими свойствами, которая явилась материальной основой беспрецедентного в истории человечества перехода от создания машин, усиливающих его физические возможности, к устройствам революционизировавшим то, что всегда относилось к его интеллектуальной работе, стала основой развития нанотехнологии – области науки и техники, результаты развития которой несравненно больше того, что мы можем представить в настоящее время.

# Раздел 1. Предельные задачи микроэлектроники

## *Введение*

Микроэлектроника – беспрецедентный в истории человечества пример развития за исторически короткое время знаний и умений, позволивших создать материальную основу изменения характера и эффективности труда практически во всех областях человеческой деятельности, и их взаимосвязанного самосогласованного развития. Успех развития во многом определяется ясностью понимания фундаментальных противоречий в задаче.

Противоречия развития микроэлектроники заложены в её парадигме –

*электронная схема это объём твёрдого тела, в котором заданные элементы обладают заданным распределением состава, а их совокупность обеспечивает выполнение преобразования, запоминания и, или, передачи сигнала, анализ состояния системы и её оптимизацию.*

Источником противоречий является и методология микроэлектроники.

*Схемная, физическая и технологическая интеграция - отличительная особенность и сущность методологии микроэлектроники.*

Реализация этой парадигмы на основе методологии интеграции определила основные черты и особенности развития современной микроэлектроники. Противоречия наиболее ярко проявляются в главных особенностях развития микроэлектроники:

### ***Постоянное увеличение***

- количества элементов в схемах и плотности их размещения;
- быстродействия элементов и схем;
- количества межсоединений;
- надёжности;
- количества и сложности значимых физических явлений и процессов в работе элементов и схем;
- количества функций, выполняемых ИМС;
- многообразия, сложности и стоимости описания схем, сложности верификации проектов;
- многообразия методов и средств контроля процессов структур и схем и управления процессами;
- роста стоимости оборудования и предприятий.

### ***Минимизация***

- размеров элементов (топологической нормы);
- перечня используемых конструкционных материалов;
- типов элементов и схем;
- перечня используемых технологических процессов;
- стоимости продукции для выполнения миллиона операций в секунду.

*В этом сонме противоречий ключевым является активный элемент ИМС.*

Формально, на сегодняшний день в массово выпускаемых ИМС нет никаких новых активных элементов по сравнению с обычными схемами на дискретных элементах – всё те же биполярные и МДП-транзисторы. Но общими у приборов, используемых в схемах на дискретных элементах и транзисторах в ИМС, остаётся только базовый принцип действия. Активные дискретные элементы и аналогичные элементы ИМС отличаются конструктивно, технологически, схемотехническим использованием, экономическими и приборными параметрами.

Количественно эти отличия по основным параметрам оцениваются как различия в десятки тысяч и десятки миллионов раз. Например, стоимость транзистора в интегральной схеме измеряется в микроцентах, а занимаемый объём меньше объёма дискретного транзистора в десятки и сотни миллионов раз. Время переключения дискретного транзистора может быть в разы меньше времени переключения аналога в ИМС.

*Количественные отличия являются отображением главного различия в дискретных устройствах и их аналогах в ИМС – при создании дискретных устройств оптимизируются индивидуальные характеристики отдельных приборов, а в микроэлектронике оптимизируются параметры ИМС.*

Такая оптимизация должна обеспечить главное - эффективное выполнение задач ИМС. Свойства каждого элемента, подчинены задаче параллельного создания миллионов подобных в едином объёме твёрдого тела, которые оптимизируют функциональные параметры ИМС и параметры устройств следующего уровня на её основе.

Так, например, уровень индивидуального мастерства каждого игрока важен, но для успеха команды определяюще важен ещё ряд других качеств.

Таким образом, совершенство каждого активного элемента в ИМС необходимое, но недостаточное условие совершенства ИМС.

Особенности активных и пассивных элементов в современных ИМС таковы, что по сравнению со схемами на обычных дискретных элементах применение пассивных элементов сокращено в десятки и сотни раз. Их конструктивные характеристики определяются технологией создания активных элементов. Свойства пассивных элементов в ИМС могут быть иными, нежели в дискретных. Параметры пассивных элементов в полупроводниковых ИМС, как правило, значительно ниже, чем у аналогичных дискретных пассивных элементов. Необходимые фазовые и энергетические задачи реализуются схемотехнически.

Основные отличия активного элемента в ИМС от его дискретного аналога определяются его нахождением ни в вакууме, ни в свободном пространстве, а в твёрдом теле. Он соединен в общую схему с остальными элементами не только проводниками – выводами, но и связями, конституционно составляющих его фрагментов, с окружением. Эти связи могут быть нелинейными, частотно зависимыми и зависимыми от

распределения потенциала в самом выделенном элементе. Поэтому один элемент ИМС может быть приближённо представлен лишь схемой из пассивных и активных дискретных элементов.

Схемотехнические решения существенно влияют на основные характеристики ИМС – их производительность, энергопотребление, массово-габаритные и прочие характеристики. Однако, при любом схемотехническом решении, базовые свойства активных элементов – фактическая схема элемента, отображающая его расположение в окружающем его объёме, быстрдействие, коэффициенты разветвления по входу и выходу, размеры элементов и др. остаются определяющими.

Поэтому в первой части пособия рассматриваются предельные задачи микроэлектроники с позиций достижения максимальной производительности, снижения энергопотребления, обеспечения надёжности ИМС. Такой подход является базой при рассмотрении тирании альтернативных подходов к созданию новых классов активных и функциональных элементов микро - и наноэлектроники.

### ***§1.1. Основные случайные факторы и их влияние на размеры элементов***

Основные случайные факторы – флуктуации свойств и флуктуации размеров.

Связь флуктуации свойств на примере флуктуаций в распределении мелких донорных или акцепторных примесей с размерами элементов -d, допуском на их свойства - δ, числа элементов в схеме -n и выходом годных -T.

Модельная структура. Выбор закона статистического распределения вероятности годного элемента – W, при дисперсии σ, концентрации носителей заряда – n, идеализированного среднего расстояния между атомами примеси – L.

$$W = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^y e^{-t^2/2} dt, \quad N = n * d^3, \quad W = T^{1/n}; T < W^n$$

$$\sigma_N^2 = N(1 - V_i/V_0), \quad y = \delta * N / \sigma_N, \quad y = \Phi(W),$$

$$y = \delta * \sqrt{N} = \delta * n^{1/2} * d^{3/2}, \quad d > \frac{[\Phi(W)]^{2/3}}{\delta^{2/3}} * L, \quad L = 1/n^{1/3},$$

$$d > \frac{[\Phi(W)]^{2/3}}{\delta^{2/3}} * L.$$

Таким образом, минимальный размер элемента должен расти по мере падения уровня легирования, однако, при переходе в область собственной проводимости размер элемента может резко уменьшиться и практически не зависеть от уровня легирования.

Основные тенденции –

1. рост уровня легирования, который встречает ограничения изменением характеристик и физических свойств;
2. использование полностью обеднённых областей, (подзатворные области МДП транзисторов);
3. использование материалов, свойства которых не зависят от уровня легирования; За – сопротивления и ёмкости в совмещённых и гибридных схемах;

3б – элементы памяти на основе фазового перехода.

### **Оценка влияния флуктуации размеров**

Причины флуктуаций – соотношение неопределённостей и дифракционные пределы.

#### **Расчёт влияния неровности края - $\Delta x$**

Если  $p$  - импульс частицы – ножа, то в соответствии с соотношением неопределённостей

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h/2\pi; \Delta x \geq h/2\pi / 2p; p = h/2\pi \cdot k, k = 2\pi/\lambda$$

$$\Delta x \geq \lambda/2\pi$$

Если выделяется элемент размером  $l$ , то в силу независимости процессов образования каждого края разброс в размере элемента  $\Delta l \geq \lambda/2^{1/2} \pi$ .

**Дифракционные явления** накладывают так же ограничения на возможности литографии. Учёт дифракции приводит к следующим ограничениям минимального размера  $l_{\min}$  и глубины резкости  $Z$ . Эти величины определяются так же апертурой объектива  $NA$ . При диаметре объектива  $D$  и его фокусном расстоянии  $F$ ,  $NA = D/F$ ;

$$l_{\min} = 0.6 \lambda / NA; Z = 0.5 \lambda / (NA)^2.$$

Таким образом, уменьшение длины волны с одной стороны уменьшает минимально достижимые размеры элементов, но с другой уменьшает глубину резкости, а следовательно и требования к расположению плоскостности экспонируемых областей в одной плоскости.

Эта ситуация породила ряд проблем, последовательно и успешно разрешаемых в течение 50-ти последних лет и актуальных в зримом будущем. К ним можно отнести следующие:

- Проблема источника с минимальной длиной волны.
- Влияние энергии кванта на локальность воздействия.
- Противоречия между локальностью воздействия и производительностью, между энергией частицы, глубиной торможения и засветкой ореолом вторичных рассеянных частиц.
- Планаризация и многослойные резисты.
- Проблема совмещения, самосовмещения и самообразования.
- Проблема флуктуаций границы при технологической обработке.
- Влияние дефектов структуры на скорость диффузионных процессов и химической и структурной модификации.
- Нефотолитографические пути создания структур (импринтинг, биооттиск и биоструктурирование и т.п.)

Выводы по случайным факторам -

*Минимальные размеры элементов, допустимые отклонения номиналов функциональных параметров, число элементов в схеме, дисперсия свойств материалов или обрабатываемого воздействия и выход годных – взаимосвязаны.*

*Отражением этих связей являются тенденции в развитии микроэлектроники в прошлых периодах и в ближайшем будущем:*

*-предпочтение цифровых методов обработки сигналов аналоговым, реализация которых не требует в полупроводниковых ИМС прецизионных пассивных и активных элементов;*

*-последовательное увеличение уровня легирования или полностью обеднённых областей;*

*-последовательное повышение требований и обеспечение однородности структур по функционально важным физическим свойствам (толщина, состав и структура слоёв, плотность дефектов, концентрации глубоких уровней);*

-переход к созданию активных элементов на основе новых явлений, основанных на базовом составе и структуре, свойствах свободных от влияния отклонений в примесях и дефектах;

-уменьшение длин волн при фотолитографии, сопряжено с уменьшением глубины резкости и увеличением области воздействия.

-преодоление противоречия между локальностью воздействия при сканировании и производительностью использованием нанопринтинга и многопучковой электролитографии.

*Кардинальными путями дальнейшей эволюции является использование веществ и процессов, свободных от влияния случайного распределения примеси, процессов самосовмещения и самоограничения размеров.*

## **§1.2. Основные регулярные факторы**

### **1.2.1. Скейлинг**

**Скейлинг** – анализ влияния изменения размеров на параметры элементов, устройств, схем. Основы скейлинга – известные связи между параметрами, свойствами и размерами, знания пределов применимости используемых связей.

Простейшими примерами скейлинга являются установление зависимостей сопротивления  $R$ , ёмкости  $C$ , времени задержки  $\tau=R \cdot C$  от коэффициента масштабирования  $K$  ( $K < 1$ ) при пропорциональном изменении геометрических параметров от начальных значений длины, ширины и толщины –  $l_0$ ,  $b_0$ ,  $d_0$ .

$$l = l_0 * K, b = b_0 * K, d = d_0 * K,$$

$$R_0 = \rho * \frac{l_0}{d_0 b_0}, C_0 = \epsilon \epsilon_0 \frac{b_0 l_0}{d_0}, \tau_0 = R_0 C_0,$$

$$R = R_0 / K, C = C_0 * K, \tau = \tau_0 * K^0.$$

Таким образом, пропорциональное уменьшение размеров приводит при таком рассмотрении к росту сопротивления и уменьшению ёмкости изолирующих разделяющих элементов при неизменности  $\tau$ .

Такой выполнен при условии, что свойства используемых материалов, независимы от величины и частоты сигнала и размеров. **Ограниченность** элементарного скейлинга можно проиллюстрировать на примере влияния зависимости подвижности носителей заряда от электрического поля на результаты скейлинга. При уменьшении размеров и неизменности разности потенциалов напряжённость электрического поля растёт. Рост поля может приводить к ряду явлений, не учитываемых как в используемых соотношениях, так и выводящих их за условия, ограничивающие их применение. Поэтому, скейлинг проводят в различных режимах. Например, так, что одновременно с изменением размеров подбирают подаваемое напряжение, так, чтобы напряжённость электрического поля поддерживать постоянной.

Однако, в настоящее время существенным, является переход в ходе скейлинга из областей обычных размеров, в которых свойства материалов не зависят от их размеров, к размерам, сопоставимым с характеристическими длинами.

### **1.2.2. Минимальные энергопотребление и время переключения**

## **Функциональное быстродействие и производительность ИМС**

Есть ли пределы скорости обработки информации, может ли быть время обработки 1-го бита сколь угодно малым? Какова минимальная энергия, которой достаточно для переключения системы или её элемента из состояния 0 в состояние 1? Есть ли пределы производительности ИМС при обработке информации? Как влияют размеры элементов и системы на её основные потребительские характеристики – производительность, стоимость, надёжность? Ответы на эти вопросы определяющие важны для понимания тех путей, по которым развивались и будут развиваться ИМС и системы обработки информации.

### **Минимальное энергопотребление**

Существует ряд подходов к оценке минимальной энергии, той работы, которую следует произвести для перевода элемента из одного фиксированного состояния в другое.

**Квантово - механический предел** непосредственно следует из соотношения неопределенностей Гейзенберга, записываемого в следующей форме:

$$\Delta E * \Delta t \geq \hbar, \quad (1.1)$$

где  $\Delta E$  и  $\Delta t$  - неопределённости в энергии и времени перехода из состояние в состояние,  $\hbar = h/2\pi = 1.05 * 10^{-34}$  Дж·с.

Тогда, минимальная энергия переключения может быть оценена, принимая за  $\Delta t$  время переключения собственное или лучшее рассматриваемого уровня.

Так, при  $\Delta t \leq 10^{-11}$ с  $\Delta E \geq 10^{-23}$  Дж.

**Термодинамический предел** рассчитывается как минимальная работа, которую нужно произвести в связи с минимальным изменением энтропии  $\Delta S$  при переходе из состояния в новое состояние

$$\Delta E > \Delta S * T; \Delta S = k * \ln 2; \Delta E > k * \ln 2 * T; \quad (1.2)$$

$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  $T = 300$ К;  $\Delta E \geq 4 * 10^{-21}$  Дж.

**Минимальная энергия одноэлектронного перехода** может быть оценена как работа  $W$ , необходимая для преодоления одним электроном барьера высотой  $n * kT$ :

$$W > q * nkT \quad (1.3.)$$

При комнатной температуре  $W \geq 5n * 10^{-21}$  Дж.

Полученные таким образом оценки на ряд порядков лучше достигнутого уровня и являются, по-существу, оценками снизу.

В полученных выше оценках нет связи с какими-либо свойствами переключателя, например, энергией переключения и, или, его размерами, надёжностью отображения информации. Для получения таких связей

необходимо задаться моделью устройства и какими-либо его характеристиками.

**Модель устройства** представляет две ямы, разделённые прямоугольным потенциальным барьером высотой  $E_b$  и шириной  $a$  (рисунок 1). Пусть нахождение электрона в левой яме соответствует 0, а в правой 1.

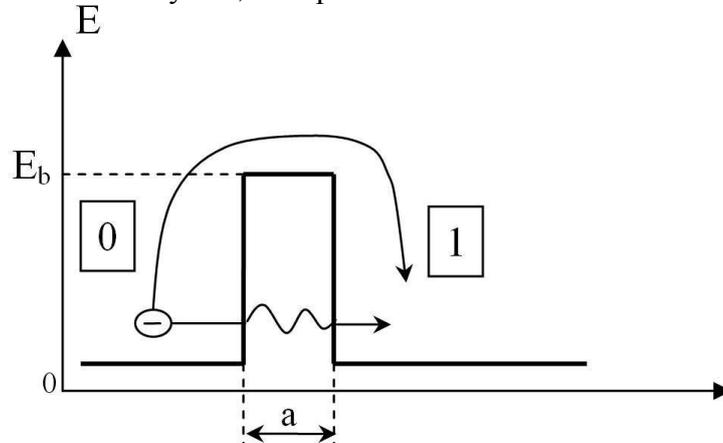


Рисунок 1. Пути преодоления электроном потенциального барьера.

Электрон может спонтанно изменить состояние вследствие классического надбарьерного перехода или квантово - механического туннельного перехода (рисунок 1). Если ширина барьера -  $a$  и его высота  $E_b$ - достаточно велики, существенную роль играет только классический надбарьерный переход. Вероятность такого перехода –  $\Pi_{кл}$ .

$$\Pi_{кл} = \exp\left(-\frac{E_b}{kT}\right) \quad (1.4)$$

Определённость состояния (0 или 1) полностью теряется при  $\Pi_{кл}=0.5$ . Решая (1.4) относительно  $E_b$  при  $\Pi_{кл}=0.5$  получим

$$E_b = kT \ln 2. \quad (1.5)$$

Такое значение высоты барьера полностью совпадает с широко известным пределом Шеннона – Неймана – Ландауэра,  $E_{SNL}$  – определяющим минимальную энергию, которую необходимо затратить для преобразования одного бита информации и с термодинамическим пределом (1.3).

Рост степени интеграции, плотностей размещения элементов и уменьшения размеров можно в выбранной модели отобразить уменьшением ширины барьера. С уменьшением ширины барьера растёт вероятность туннельных переходов. Аналитическая запись вероятности туннелирования через прямоугольный барьер -  $\Pi_{тун}$  даётся аппроксимацией Венцеля-Крамерса-Бриллюэна (WKB) [5].

$$\Pi_{тун} = \exp\left(-\frac{4\pi\sqrt{2m^*}}{h} a\sqrt{E_b}\right) \quad (1.6)$$

Суммарная вероятность осуществления перехода по двум взаимоисключающим механизмам  $\Pi = \Pi_{кл} + \Pi_{тун} - \Pi_{тун} * \Pi_{кл}$ .

$$\Pi = \exp\left(-\frac{E_b}{kT}\right) + \exp\left(-\frac{4\pi\sqrt{2m^*}}{h} a\sqrt{E_b}\right) - \exp\left(-\frac{4\pi\sqrt{2m^*}}{h} a\sqrt{E_b}\right) * \exp\left(-\frac{E_b}{kT}\right) \quad (1.7)$$

Значение  $\Pi=0.5$  соответствует полной неопределённости и решением (1.7) можно найти минимальную энергию  $E_b$ , при данной ширине барьере и эффективной массе  $m^*$

$$E_b^{\min} = kT \ln 2 + \frac{h^2 (\ln 2)^2}{32\pi^2 m^* a^2} \quad (1.8)$$

Полученная таким образом зависимость минимальной энергии переключения от размера – ширины барьера, иллюстрируется рисунками 1а, 1б.

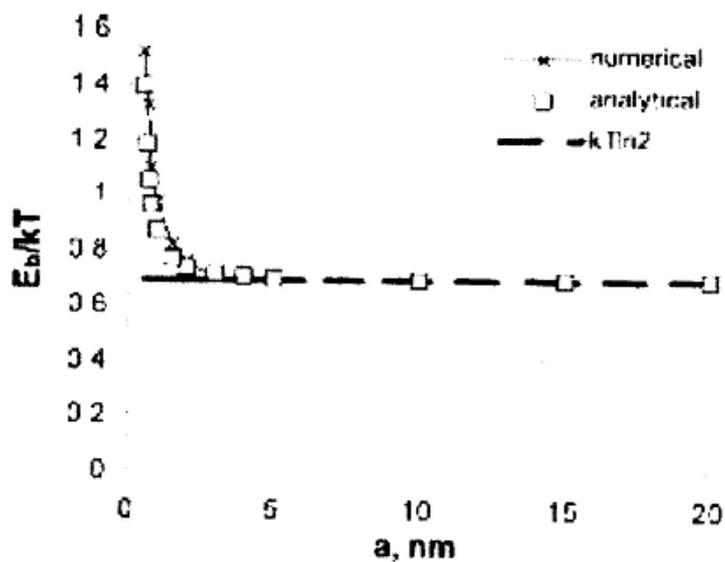


Рис. 1а. Зависимость энергии переключения от размера зазора  $a$ .

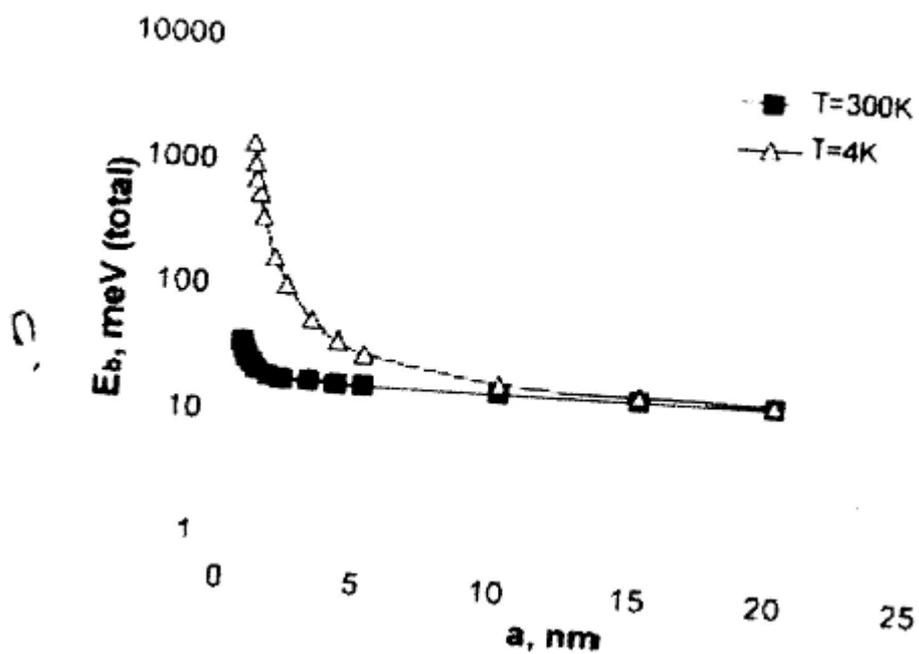


Рис. 1б. Зависимость суммарной энергии переключения от зазора  $a$  При температуре 4 и 300К

## Оценка минимального размера и максимального быстродействия

Зная диапазон значений размеров элементов и энергии переключения можно оценить ряд параметров элементов и схем. Для этого запишем соотношение неопределённостей Гейзенберга как

$$\begin{aligned} E_b \cdot t_{\min} &\geq \hbar \\ a \cdot \Delta p &\geq \hbar \end{aligned} \quad (1.9)$$

Учитывая, что  $\Delta p \leq 2p$  получим

$$\begin{aligned} t_{\min} &> \frac{\hbar}{E_b} \\ a &> \frac{\hbar}{2\sqrt{2m^* E_b}} \end{aligned} \quad (1.10)$$

При  $m^* = m_0$  – массе свободного электрона и  $E_b = E_{\text{SNL}} = kT \cdot \ln 2$

$$\begin{aligned} a &> 1.5 \text{ нм} \\ t_{\min} &> 0.04 \text{ нс} \end{aligned} \quad (1.11)$$

Частота циклов  $f = 1/2t_{\min}$ , с учётом (1.10)

$$\begin{aligned} f &\leq \frac{E_b}{2\hbar} \\ f &\leq 1.2 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}. \end{aligned} \quad (1.12)$$

и при  $E_b = E_{\text{SNL}}$

Воспользовавшись ранее полученной связью (1.8) минимальной энергии перехода от ширины барьера можно оценить время перехода и частоту переключения  $f_1$  в зависимости от ширины барьера  $a_1$ , аналогично сделанному ранее. Полученные результаты иллюстрируются рисунком 2, на котором значения ширины барьера -  $a$  в нм, а времени  $t$  в секундах.

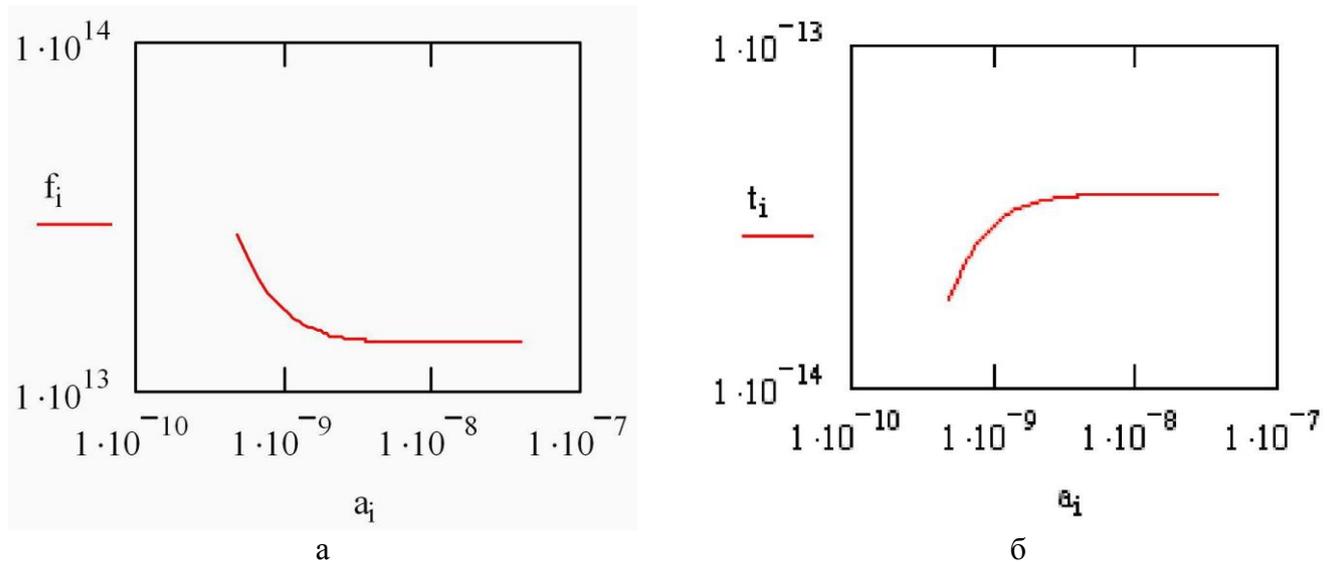


Рисунок 2. Зависимость частоты переключения  $f$  от ширины барьера  $a$  (а) и зависимость времени переключения  $t$  от ширины барьера  $a$  (б) (см. пояснения в тексте).

Минимальное время переключения может быть оценено по времени переноса носителя заряда под подвижностью  $\mu$  в результате дрейфа, например, от истока к стоку при длине канала  $a$ , и разности потенциалов между истоком и стоком  $-V_{ис}$ .

$$t_{\min, \text{переноса}} = \frac{a}{v} = \frac{a}{\mu E} = \frac{a^2}{\mu V_{ис}} \quad (1.13a)$$

Тогда максимальная частота циклов –

$$f_{\max} = \frac{\mu V_{ис}}{2a^2} \quad (1.13б)$$

Максимальное число элементов на единице площади –  $N$

$$N \leq \frac{1}{a^2} \quad (1.14)$$

При  $a=1.5$  нм  $N \leq 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ .

Производительность  $-W$  в первом приближении можно полагать линейно зависящей от плотности расположения элементов и частоты циклов.

$$W = N \cdot f \quad (1.15)$$

Производительность может быть выражена через базовые значения размера  $a$  и энергию переключения следующим образом:

$$W \leq \frac{E_b}{2\hbar a^2} \quad (1.16)$$

Принимая  $E_b = E_b^{\min}$  соответствие с (1.8), (1.14) получим

$$W = \frac{kT \ln 2}{2\hbar a^2} + \frac{\hbar \cdot (\ln 2)^2}{16m^* a^4} \quad (1.16a)$$

Полученная таким образом зависимость, представленная на рисунке 3, практически линейная в двойном логарифмическом масштабе.

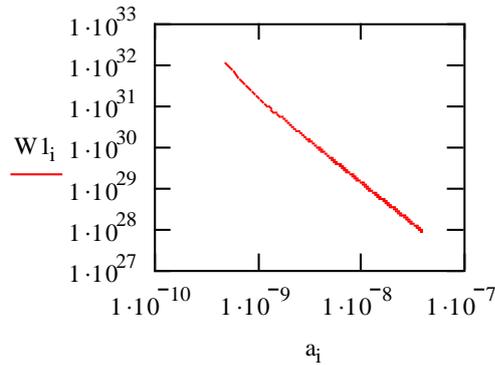


Рисунок 3. Зависимость производительности  $W$  от длины канала  $a$ , в двойном логарифмическом масштабе.

Таким образом, связь между максимальной плотностью размещения элементов и их размерами может быть аппроксимирована зависимостью вида

$$W = \beta \cdot a^\alpha$$

Воспользовавшись (1.16б) и (1.17) получим следующее выражение для описания производительности

$$W \leq \frac{\mu V_{uc}}{2a^4} \quad (1.16б)$$

Затрачиваемая для обработки информации энергия при используемых необратимых процессах преобразования переходит в тепло и рассеивается в системе. Превышение потреблённой энергии над выделенной и покинувшей систему приводит к росту температуры и, в конечном счете, к потере работоспособности. Наибольшую выделяемую энергию  $P_{max}$  можно записать как  $P_{max} = NfE$ . Здесь  $E$  – энергия переключения. С учётом (1.8) и (1.16)

$$P_{max,i} = \frac{\hbar E_i^2}{a_i^2}$$

$$P_{max} = W * E; P_{max} = W * \left( kT \ln 2 + \frac{\hbar^2 (\ln 2)^2}{32\pi^2 m^* a^2} \right) \quad (1.17)$$

$$P_{max} = \left( \frac{kT \ln 2}{2\hbar a^2} + \frac{\hbar * (\ln 2)^2}{16m^* a^4} \right) * \left( kT \ln 2 + \frac{\hbar^2 (\ln 2)^2}{32\pi^2 m^* a^2} \right)$$

Зависимость плотности мощности от размера  $a$ , рассчитанная по (1.17), иллюстрируется рисунком 4.

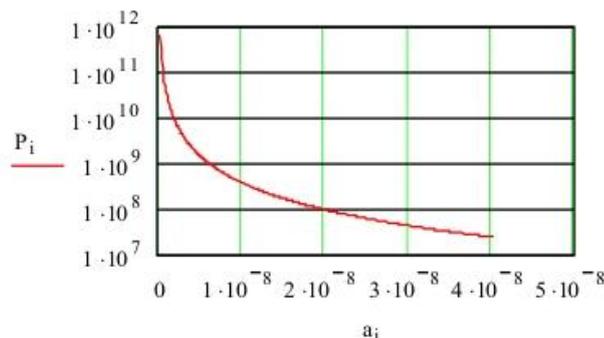


Рисунок 4. Зависимость плотности мощности  $P$  от размера  $a$ .

Полученные таким образом оценочные формулы показывают, что основные функциональные характеристики ИМС – плотность элементов, их быстродействие, производительность ИМС и выделяемая мощность, которая должна быть рассеяна, растут по мере уменьшения размеров элементов

$$N \sim a^{-2}, f \sim a^{-2}, W \sim a^{-(2..4)}, P \sim a^{-(2..6)}.$$

Таким образом, проведенное рассмотрение показывает, что предельно возможные основные параметры отдельных элементов безотносительно к их надёжности принципиально могут быть весьма высокими - минимальные размеры барьеров ~1.5 нм, энергетическая высота барьера до  $10^{-21}$  Дж, скорость переключения ~  $10^{-13}$  с.

Вся история развития микроэлектроники – это история последовательного уменьшения размеров элементов, история уменьшения топологической нормы. Но как показывает проведенное рассмотрение, путь уменьшения размеров с одной стороны не исчерпан, а с другой - принципиально ограничен.

**Принципиальные ограничения определяются необходимостью обеспечения не оптимального функционирования отдельных элементов, а их совместной работы, обеспечивающей оптимум характеристик схемы.**

Одним из принципиальных ограничений является теплоотвод. Допустимая температура конечна и для кремниевых ИМС не должна превышать 400К (~125<sup>0</sup>С). Повышение температуры ведёт к ускорению деградиционных процессов, сбоям, к потере надёжности.

Расчёт даже по упрощенной формуле, в которой энергия переключения принята минимальной равной  $E_{SNL}$ , приводит к гигантским значениям плотности выделяемой мощности. Так при размере  $a=1.5$  нм плотность энергии переключения достигает при комнатной температуре  $3.7 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>.

Это значение можно сопоставить с плотностью мощности на поверхности солнца, оцениваемой в ~6000 Вт/см<sup>2</sup> или с плотностью мощности обычной лампы накаливания ~100 Вт/см<sup>2</sup>.

Уменьшение размеров элементов не приводит к снижению плотности выделяемой мощности. Вклад туннелирования сопровождается ростом энергии переключения, как это видно из приведенного выше рисунка 3. Растут плотность размещения элементов и возможная частота переключений.

Всё это приводит к резкому росту максимальной плотности мощности с уменьшением размеров и ещё более важной делает проблему улучшения теплоотвода.

Температура окружающей среды  $T_a$  обычно ниже температуры охлаждаемого устройства  $T_d$ . В этих условиях основными видами теплоотвода являются: кондуктивный - непосредственно от активного элемента и, или, конвективный - от элемента и радиатора. В соответствии с законом Ньютона, количество отводимой тепловой энергии  $Q$  линейно связано с разностью температур устройства и окружающей среды.

$$Q = H * (T_d - T_a) \quad (1.18)$$

Коэффициент передачи тепла  $H$  определяется процессом теплопереноса, рядом конструктивных особенностей и свойств сред. Значительный теплообмен может быть осуществлён при форсированном жидкостном кондуктивном теплоотводе. В устройствах обработки информации первичное выделение тепла локализовано. Фактически в ИМС тепловая энергия выделяется в слое толщиной менее 10 мкм, но охлаждению способствует высокая теплопроводность кремния, близкая к теплопроводности молибдена.

Экспериментально установлена возможность удаления тепловой мощности плотностью 790 Вт/см<sup>2</sup> от кремниевой пластины форсированным водяным охлаждением в системе со встроенными микроканалами. Это значение близко к расчётному пределу удаления тепла

с поверхности кремния  $\sim 1000 \text{ Вт/см}^2$ . Подобные значения плотности отводимого тепла получены и для других альтернативных методов отбора энергии – использования фазовых переходов и термоэлектрического охлаждения.

При охлаждении сжиженными газами непосредственно тепловыделяющего элемента разность температур может достигать 200- 300К, что в соответствии с (1.21) может увеличить отвод тепла в несколько раз. Однако, суммарный расход энергии на 1 бит –  $E_{tot}$  растёт тем быстрее, чем меньше размер  $a$ . По теореме Карно в идеальном случае

$$W = \frac{T_d - T_a}{T_d} Q \quad \text{для отбора } Q \text{ тепла нужно затратить не менее чем } W \text{ энергии.}$$

$$E_{tot} = E_b + \frac{T_d - T_a}{T_d} E_b; E_{tot} = [2 - \frac{T_a}{T_d}] * [kT \ln 2 + \frac{h^2 (\ln 2)^2}{8ma^2}] \quad (1.19)$$

Уменьшение размеров до значений, при которых существенным становится туннелирование, приводит к резкому росту тепловыделения. При этом работа при криогенных температурах устройства лишь резко увеличивает затраты энергии на каждый бит обрабатываемых данных.

Однако, возможности совокупного функционирования элементов с такими предельными параметрами существенно ограничены, в частности теплоотводом. Плотность энергии, которую потребовалось бы отводить от устройства с такими характеристиками элементов в соответствии с (1.20), намного порядков превосходит плотность энергии, удаляемой с поверхности солнца. Уменьшение размеров элементов, переход в нанометровый и субнанометровый диапазоны не уменьшают, а резко увеличивают затраты энергии в расчёте на бит обрабатываемой информации.

Сопоставление полученных оценок с присущими реально выпускаемым и планируемым на обозримое будущее ИМС по ряду характеристик приведено в таблице 1. На первый взгляд разрывы между принципиально возможными и характеристиками ИМС, даже ожидаемыми к 2022 году необычайно велики. Однако, анализ свидетельствует скорее об их близости, нежели об обратном. Анализ должен учитывать, что размеры элемента ИМС, например, линейный размер транзистора –  $l$  и его существенного звена, например, барьера –  $a$ , для которого проведено рассмотрение, отличаются более чем на порядок. Обычно,  $l \approx 10-15a$ . С учётом этого плотность размещения элементов уменьшается до  $\sim 5$  миллиардов на квадратном сантиметре, что близко к ожидаемой уже в 2018-м году плотности  $\sim 3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ . Плотность выделяемой мощности снижается пропорционально уменьшению плотности размещения элементов от астрономически больших значений к близким, хотя и существенно большим прогнозируемых к 2018 году значениям (от  $3.7 \cdot 10^6$  до  $< 600$ , при ожидаемых  $93 \text{ Вт/см}^2$ ).

Тем не менее, такие значения мощности оказываются критически запредельными. Такой прогноз выполнен с учётом того, что мощность переключения минимальна и связана с размерами барьеров выражением (1.5).

Таблица 1. Сопоставление значений параметров элементов.

Плотность элементов ( $a=1.5\text{нм}$ ) (транзисторы/ $\text{см}^2$ ) С учётом отличия $l$ и $a$	По проведенным оценкам 2016 ITRS (22нм) При $l \approx 10a$	$4.7 \cdot 10^{13}$ $2.9 \cdot 10^9$ $4.7 \cdot 10^9$
Время переключения, фс	По проведенным оценкам ( $t_{\min} = \hbar / kT \ln 2$ ) 2016 ITRS (22нм, $t = CV/I$ )	40 150
Плотность мощности, $\text{Вт/см}^2$	По проведенным оценкам ( $P_{\max} = n_{\max} kT \ln 2 / t_{\min}$ )	$3.7 \cdot 10^6$ 93

	2016 ITRS (22нм) При $l \approx 10a$	<600
Нормализованная плотность мощности (Вт/см <sup>2</sup> )		61

Используется значение энергии переключения, получаемое на основе этого выражения, при минимально возможной надёжности переключения ( $\Pi=0.5$ ). Получаемое т.о. значение  $E$  находится на уровне  $E_{SNL} = kT \cdot \ln 2 \approx 3 \cdot 10^{-21}$  Дж. Однако, вероятность сбоя у практически приемлемого устройства должна быть намного порядков меньше. Этого можно достичь, увеличивая высоту барьера  $E$  и, или, его ширину  $a$ . Для оценки значений  $E$ , при различных задаваемых значениях вероятности сбоя и ширины барьера, проводилось численное решение уравнения (1.7). Этому уравнению введением  $x = (E/kT)^{1/2}$  придан следующий вид.

$$f(x) = \exp(-x^2) + (\exp(-x))^b - \exp(-x^2) * (\exp(-x))^b - P = 0, \quad (1.20)$$

в котором  $b = \frac{2\sqrt{2mkT}}{\hbar} a$ . Проведенными расчётами установлено существенный рост минимально необходимой энергии переключения для повышения надёжности - уменьшения вероятности спонтанного переключения.

При ширине барьера больше нескольких нанометров влияние туннелирования становится пренебрежимо малым и уравнение упрощается до  $\exp(-E/kT) = P$  и в этом диапазоне минимальная энергия, необходимая для обеспечения надёжности, растёт как  $-\ln(P)$ . Так при ширине барьера 15нм и  $P=10^{-6}$  эта энергия превосходит предел Шеннона-Неймана-Ландауера -  $E_{SNL}$  примерно в 20 раз.

С уменьшением ширины барьера в субнанометровую область, энергия переключения, необходимая для обеспечения надёжности, растёт весьма круто. Так, если при  $a=1$ нм и  $P=0.5$  необходимая энергия превосходит  $E_{SNL}$  менее чем в 1.5 раза, то для обеспечения вероятности сбоев  $P=10^{-6}$  нужна энергия большая  $E_{SNL}$  в 77раз. Ещё круче этот рост при переходе ширины барьера в молекулярный и атомный диапазоны, т.е. при  $a < 1$ нм.

Учёт того, что поверхность схемы частично занята межсоединениями, не вносит существенных изменений, поскольку межсоединения также являются тепловыделяющими элементами. Рассредоточение элементов в схемах большей площади также встречается с необходимостью преодоления ряда трудностей, связанных как с падением выхода годных, так и увеличением времени распространения сигнала в схеме. По-видимому, ухудшение массогабаритных характеристик для основных применений играет наименьшую роль. Следует отметить, что площадь ИМС наиболее неизменная из её характеристик. В то время как основные параметры ИМС изменились на несколько порядков, площадь схем не возросла даже в несколько раз.

Наиболее сильно отличаются расчётное минимальное значение энергии, необходимое для преобразования бита информации, и практически затрачиваемое значение такой энергии.

Естественным было бы ожидать уменьшения энергии переключения при переходе от обычных полупроводниковых транзисторных элементов к переключателям, использующим другие физические принципы. Эти возможности будут более детально обсуждены далее. Сейчас мы ограничимся таблицей, в которой сопоставлены только энергии переключения при различных механизмах по данным ITRS 2007.

Таблица 2. Значения энергии переключения различных элементов.

ЭНЕРГИЯ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ	КМДП Si	МДП на графене, углеродных нанотрубках	МДП гетероструктуры	Одноэлектронные транзисторы	Молекулярные перекрещивающиеся нити ККА	Сегнетоэлектроники ККА	Спин транзисторы

Лучшее расчётное ожидаемое значение Дж*10 <sup>18</sup>	3*	3*	3*	>15	50	10	3
Лучшее экспериментально достигнутое значение Дж*10 <sup>18</sup>	100	10 <sup>7</sup>	100	80	3·10 <sup>11</sup>	6	Не известно

Как следует из приведенных данных, лучшие расчётные значения энергии переключения отличаются от предельных в 1000 и более раз, а лучшие экспериментально достигнутые хуже расчётных для данного механизма так же на 1-2 порядка. При этом по энергии переключения кремниевые транзисторные МДП структуры не уступают альтернативным. Наряду с индивидуальными причинами различия расчётных и экспериментальных значений в каждом из механизмов существуют и общие для всех. К ним в первую очередь следует отнести влияние паразитных связей, возникающих при размещении переключателя в схеме, и утечек сигнала, вызванных такими связями. Не меньшее значение имеет разброс характеристик переключателей, приводящий к необходимости увеличения используемого логического размаха в схеме, например, управляющего напряжения по сравнению с разностью управляющих напряжений, достаточной для переключения одного элемента.

Рассеяние энергии в высокоинтегрированных схемах оказывается главным источником беспокойства и заботы разработчиков и промышленности, так же как и производителей энергии. Потребление энергии компьютерами по данным 2007 года в США достигает 20% всего производства энергии и продолжает расти.

Эволюция элементов ИМС и ИМС привела к новому уровню интеграции – созданию ИМС с высокой избыточностью числа элементов и встроенными программными решениями, обеспечивающими при решении конкретных задач заданные оптимальные эксплуатационные характеристики при безусловном обеспечении параметров, определяющих надёжность и в том числе – теплоотвода.

## Раздел 2. Эволюция биполярных транзисторов в ИМС

### §2.1. Введение.

В течение последних нескольких лет ИМС на основе биполярных транзисторов (БТ) полностью исчезли как из текущих обзоров, так и из прогнозирования развития микроэлектроники по крайней мере до 2022г. В тоже время при подготовке бакалавров и специалистов по микроэлектронике изучению БТ и БТ в ИМС уделяется значительное внимание. Это объясняется не инерционностью обучения, и не только возможным, хотя и постоянно сокращающимся применением БТ в специальных аналоговых ИМС. Главная причина заключается в той исключительной роли, которую сыграли БТ в современном материальном мире и изучение их развития позволяет систематизировать знания и служит обучению целенаправленной деятельности. Возможности прибора, были замечены уже при его первой демонстрации. **«Транзистор интересен не тем, что может заменить электронную лампу, а прежде всего тем, что может дать то, на что не способна она».** Такой подход (а не просто сопоставление с предшественником или аналогом) следует признать продуктивно верным при оценке нового. С этих позиций принципиально новым свойством БТ является возможность его создания на основе физической и технологической интеграции. Именно возможность создания прибора на основе одного исходного материала путём локального изменения его состава обусловила возможности выпуска устройств со всё возрастающим числом элементов при постоянно снижаемой стоимости отдельного элемента и стоимости в расчете на выполняемую функцию, и практически неизменной надёжности устройств. Не следует думать, что будущее науки о полупроводниках и беспрецедентно динамичное и массовое применение её приложений было всегда очевидным, как собственно и электроники в целом. За 16 лет до открытия транзистора Нобелевский лауреат Вольфганг Паули говорил в 1931 году о полупроводниках следующее: «Не нужно работать с полупроводниками – это грязное месиво, кто знает существуют ли они в действительности». В этом же году А.Ф. Иоффе опубликовал статью с пророческим названием «Полупроводники – новые материалы электроники», а несколько лет спустя появилась работа В.П. Жузе и Б.В. Курчатова, пояснившая роль примесей (грязи) в полупроводниках.

В истории создания БТ, как и в историях ряда великих открытий, элементы случайности и целенаправленный поиск нерасторжимы. Яблоко упало на голову, которая напряжённо думала о силе притяжения. Наверное, и до этого яблоки падали на ряд голов. Браттейн перепутал полярность электродов, (а кто не путал?) и мгновенно зафиксировал усиление тока - то, что так искали. В обоих случаях работы проводились на самом высоком для своего времени теоретическом уровне. Собственно говоря, точечный транзистор, созданный Бардиным, Братейном и Шокли, был совершенно не

тем по физическому принципу работы, на основе которого вначале планировалась работа. Конструктивно точечный транзистор практически бесполезен для создания ИМС. Но в течение одной недели после успешной реализации точечного транзистора Шокли предложил в качестве транзисторной ррр структуру, явившуюся основой реализации идеи монолита.



*Рисунок 1. Бардин, Браттейн и Шокли у первого точечного транзистора.*

Создание ИМС было удостоено Нобелевской премии. Она была присуждена Джеку Килби, который в 1958 году создал первую полупроводниковую ИМС, полностью отвечающую идее монолита. Эту идею за 5 лет до этого сформулировал Джеффри Даммер (Geoffrey Dummer) из Royal Radar Establishment. В мае 1952 года в США он завершил свой доклад на симпозиуме по электронным компонентам следующим:

«С открытием транзистора и работами по полупроводникам в настоящее время кажется возможным предусмотреть электронное оборудование в виде блока твёрдого тела, не содержащего соединительных проводов. Блок может состоять из слоёв изолирующих, проводящих, выпрямляющих и усиливающих материалов, в котором электронные функции соединены непосредственно путём вырезания областей различных слоёв».

В своей Нобелевской речи Дж. Килби отдал должное Джеффри Даммеру, сказав «это было замечательное предложение... Моя заслуга в том, что я взял эту идею и превратил её в реальность». В 1956 -57 гг. Джеффри Даммер работал над реализацией идеи монолита, но получить экспериментально действующий образец не удалось. Эту задачу выполнил Килби в рекордно короткое время на основе того технологического опыта, который был

накоплен в Техас Инструментс. Пассивные элементы у Даммера и Килби были близкими, а транзисторы существенно разными. Даммер в качестве базы использовал монокристаллический германий, в ходе выращивания которого примеси вводились так, чтобы образовалась слоистая рпр структура. Последующим локальным травлением образовывались меза-структуры, такие же, как и при изготовлении дискретных транзисторов. Выводы осуществлялись на различных уровнях. Килби использовал специальные структуры, в которых области эмиттера и базы образовывались диффузией примесей и объёмная разводка была минимизирована. Динамизм развития БТ – одно из характерных его свойств. Особенно быстро и целенаправленно развивались БТ в ИМС.

Эти первые работы убедительно показали необходимость создания новых конструкций БТ, отличных от дискретных приборов. К этому времени были предложены, успешно реализованы ряд конструкций плоскостных рпр и рпр БТ. Была разработана теоретическая база и ряд алгоритмов расчёта БТ. Для успешного применения транзисторов в ИМС должны были быть решены 2 проблемы – проблема расположения всех выводов транзистора в одной плоскости и проблема изоляции транзистора от остального материала схемы и внешнего воздействия. Решению обоих проблем способствовали работы Роберта Нойса и Джина Хорни (Jean Hoerni). Спустя 6 месяцев, после того как Килби в Техас Инструментс создал первую схему в монолите, названную интегральной схемой, Нойс в Fairchild независимо создал подобную интегральную схему из кремния с использованием нового метода, разработанного Джином Хорни (Jean Hoerni). Хорни ввёл в технологию микроэлектроники новый процесс – процесс окисления кремния. На первый взгляд тем самым была решена весьма важная, но всё-таки частная задача – задача снижения токов утечки и повышения надёжности путём замены части монокристаллического кремния его окислом. Технология сразу же нашла эффективное применение при создании дискретных плоскостных БТ. Но всё значение метода модификации полупроводникового материала его соединениями трудно оценить и раскрывается с каждым этапом развития микро - и нанотехнологии всё полнее и полнее. Можно согласиться с теми, кто считает, что это "the most important innovation in the history of the semiconductor industry." -«наиболее важная инновация в истории полупроводниковой индустрии»



*Рисунок 2. Джин Хорни (Jean Hoerni).*

Введение окисления явилось основой т.н. планарной технологии, которая со времени создания Нойсом первой ИМС, служит основой развития микро - и нанoeлектроники.



*Рисунок 3. Роберт Нойс.*

Заслуживает специального акцентирования следующее обстоятельство – проблема надёжности явилась движущей причиной поисков Джеффри Даммера, приведших к идее монолита, и эта же проблема, в частности проблема надёжности транзисторных мезоструктур, привела Хорни к модификации кремния. До Хорни в полупроводниковой технологии широко использовалось легирование материала малым количеством примеси.

Образование нового материала путём его химической модификации необычайно обогатило конструктивные и технологические возможности полупроводниковой технологии, создав не только средства защиты в ходе и по завершению процессов создания ИМС, но необычайно расширив сам арсенал доступных материалов, поскольку сам окисел или нитрид и контактирующие с ними слои кремния могут иметь широкий спектр технологически управляемых свойств, свойств в ряде случаев управляемых электрическим полем заданным образом. Химическая модификация, в частности окисление, наряду с эпитаксией, литографией и диффузией является основой планарной технологии, адекватной интеграции технологических процессов микроэлектроники и на многие годы определившей её развитие.

Расчёт и моделирование дискретных БТ и в ИМС обычно ведётся на основе т.н. системы базовых уравнений полупроводниковой электроники – уравнений плотности тока, непрерывности и уравнения Пуассона. При этом плотность объёмного заряда считается однозначно связанной с разностью концентраций донорных и акцепторных уровней. Тем самым полагается, что структура находится вне условий, порождающих необходимость учёта размерных эффектов, и исключается влияние глубоких уровней. Это оправдано по отношению к обычным для БТ ИМС при технологических нормах больших или порядка 100нм. Разработан и используются ряд алгоритмов и реализующих их программ таких расчётов. Естественно, что при проведении расчётов используются т.н. паспортные связи между свойствами кремния – связь между концентрацией основных и неосновных носителей заряда, зависимости свойств рп-переходов от концентраций носителей заряда и разности потенциалов, зависимости ширины запрещённой зоны от концентрации примесей, подвижности от электрического поля и т.п. Разбиение задачи на поиск решений в нейтральных участках, в которых плотность объёмного заряда  $\rho$  близка к нулю и в участках, в которых  $\rho \neq 0$  по мере уменьшения размеров теряет эффективность. Основными методами расчёта стали методы конечных элементов и конечных разностей при решении этих задач.

Конструктивно – технологическое развитие БТ ИМС вызвало к жизни ряд базовых процессов, создавших основу современных методов получения микро - и наноструктур и устройств на их основе. Последовательному анализу развития БТ в ИМС посвящено дальнейшее содержание этой главы.

**§2.2. Планарно-эпитаксиальный биполярный транзистор в ИМС и паразитные элементы**

**Планарно-эпитаксиальный биполярный транзистор в ИМС**

Базовым элементом ИМС в течение ряда лет служил планарно-эпитаксиальный транзистор с изоляцией рп переходом, представленный на рисунке 4а и 4б.

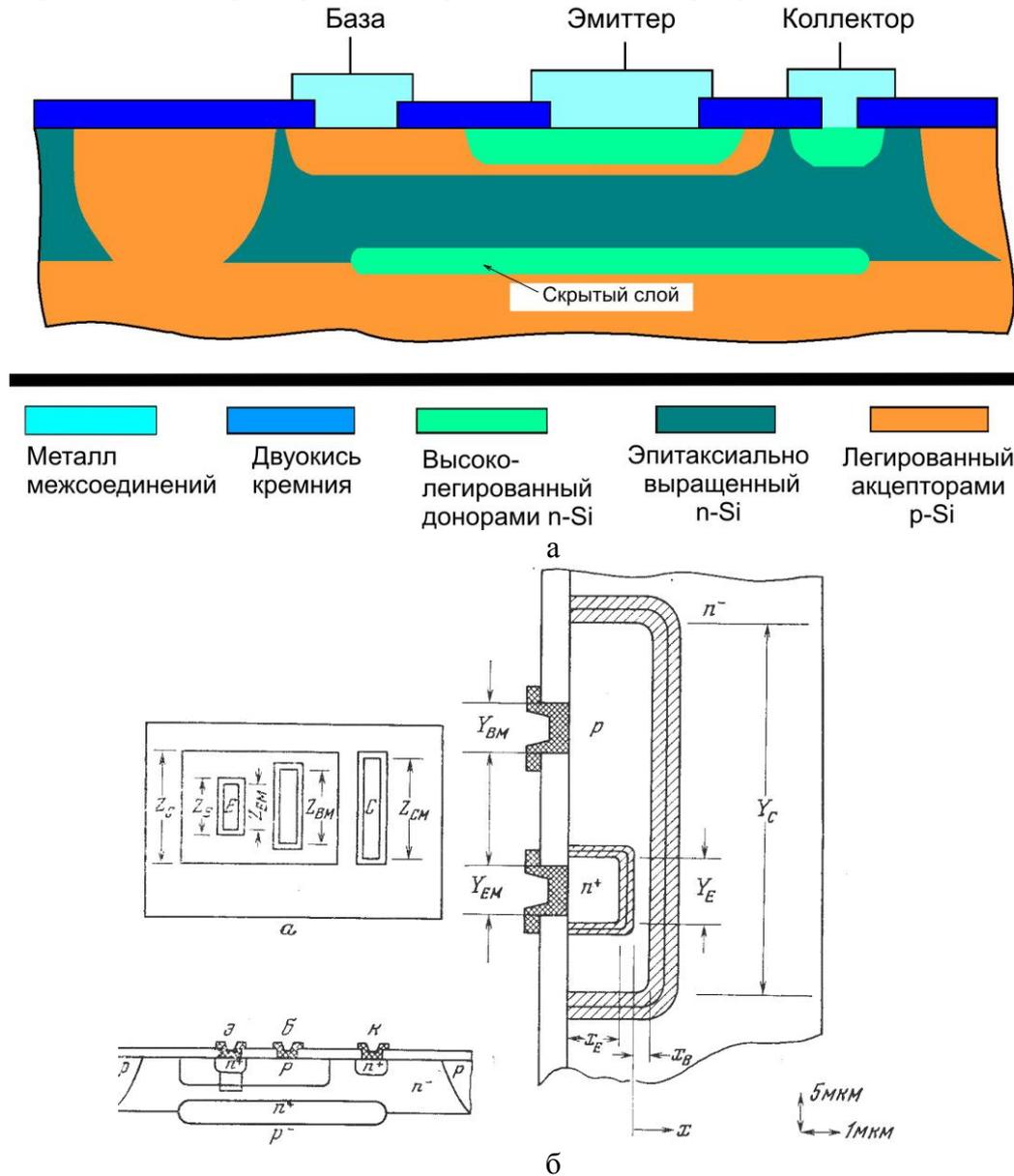


Рисунок 4. Планарно-эпитаксиальный биполярный транзистор в ИМС (а). Эскиз планарно-эпитаксиального биполярного транзистора в ИМС (б) (защитрованы области рп - переходов.)

На рисунке 5.а представлена кремниевая пластина р-типа проводимости, уже прошедшая ряд операций – предварительную подготовку, окисление, литографию и травление, позволившие вскрыть области будущих скрытых

слоёв, диффузию мышьяка в открытые области кремния и последующее окисление.

Результат следующего этапа – эпитаксиального осаждения будущего коллекторного слоя электронной проводимости, представлен рисунке 5.б.

Рисунок.5.в и 5.г иллюстрируют создание диффузионных разделительных областей, которыми выделяются области электронной проводимости – области будущих транзисторов и других элементов схемы, изолированные образованными рп-переходами.

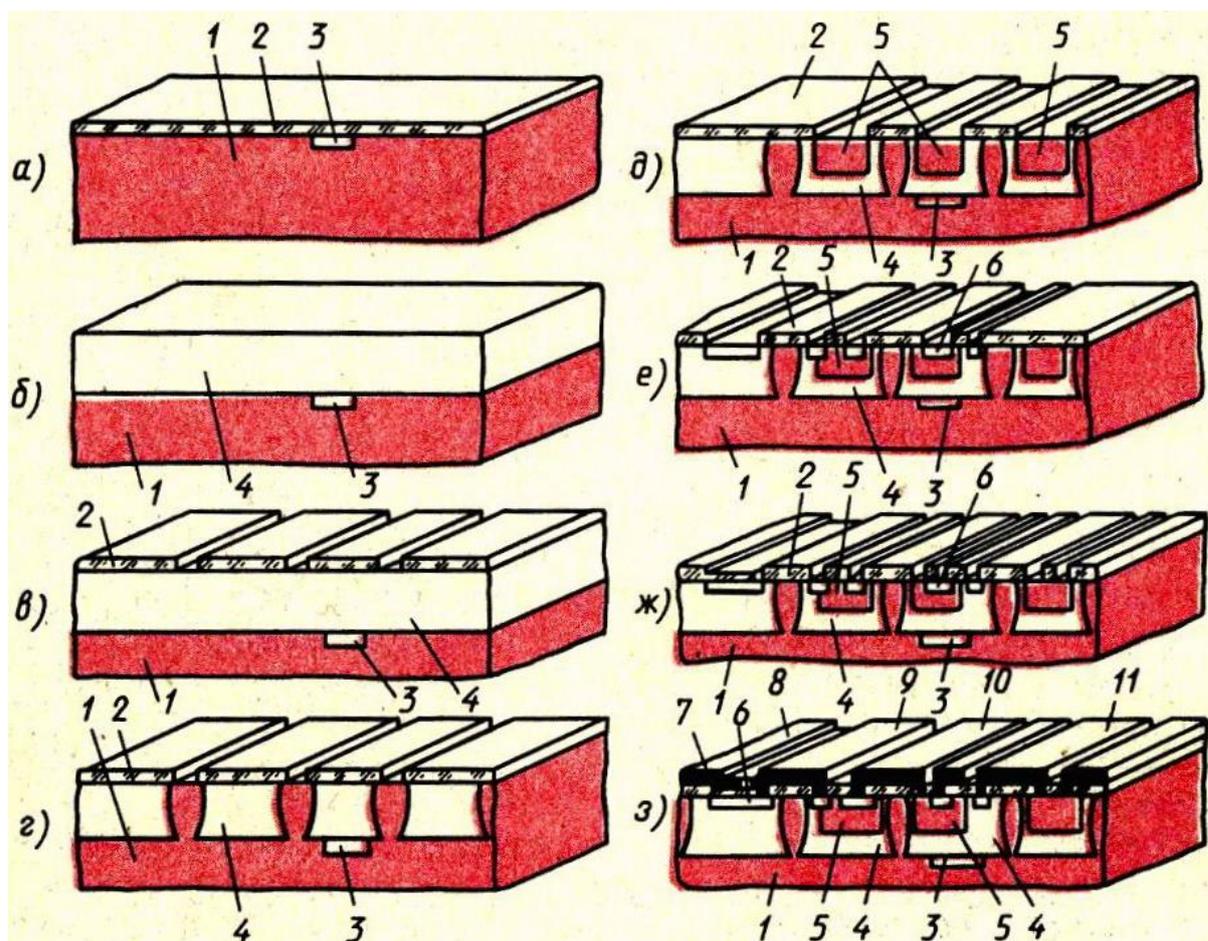


Рисунок 5. Последовательность формирования кристалла полупроводниковой ИМС по планарно-эпитаксиальной технологии:

1 - подложка р-типа; 2 - оксид кремния; 3 - скрытый слой  $n^+$ - типа; 4- эпитаксиальный слой  $n$ -типа (коллекторные области); 5- базовая область р-типа; 6 - эмиттерная область  $n^+$ - типа; 7- металлизация; 8-конденсатор на основе оксида кремния; 9-диод ( $U_{кб}=0$ ); 10 – биполярный транзистор; 11 - диффузионный резистор р-типа.

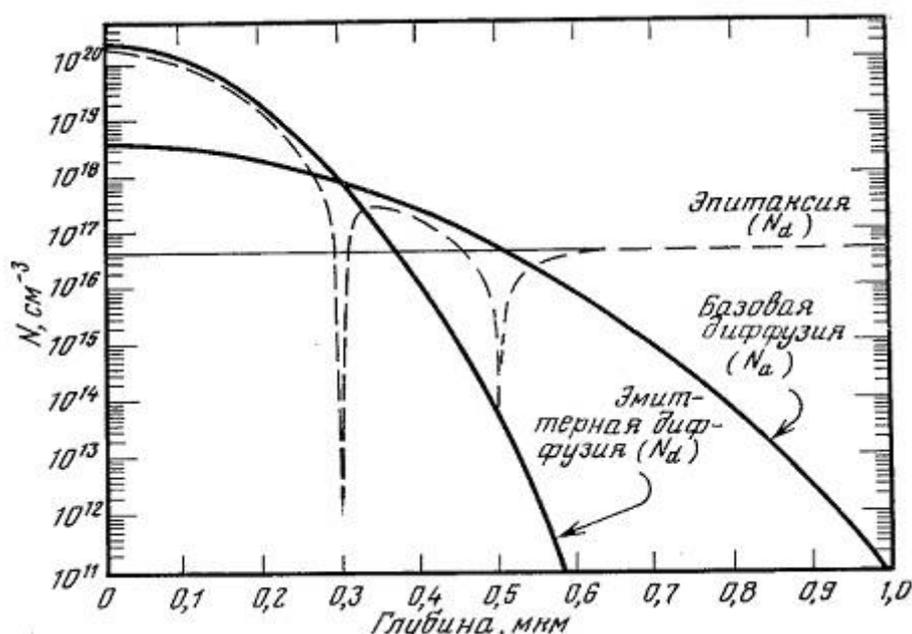
Диффузия акцепторов в предварительно выделенные литографией участки создаёт будущие базовые области и области, например, будущих диффузионных резисторов (рисунок 5.д).

Затем следуют последовательности операций, которыми образуются внутри базовых областей высоколегированные участки электронной проводимости (эмиттеры, обкладки конденсаторов) и внутри коллекторных

областей участки для получения омических контактов при создании межсоединений (рисунок 5е,ж).

Заключительными операциями создаются межсоединения и защитные покрытия (рисунок 5з).

Для создания заданного распределения примесей используется последовательность температурных обработок, в том числе одно и двухстадийная диффузия, ионное легирование, селективное травление. В качестве защитных и диэлектрических покрытий и областей используются оксид, нитрид и оксинитрид кремния. Рисунок 6 иллюстрирует распределение примесей в структуре БТ в ИМС.



Транзистор – островок эпитаксиального слоя электронной проводимости, окружённый материалом, легированным акцепторами. Снизу – подложка р типа проводимости и области разделительной диффузии, пронизанные акцепторами на всю толщину эпитаксиального п слоя, образуют рп-переходы.

Также обратными смещёнными переходами могут быть изолированы и пассивные элементы схемы.

Планарно-эпитаксиальная технология, развитая при создании промышленного массового выпуска ИМС на основе планарно-эпитаксиальных диффузионных транзисторов позволила решить ряд базовых проблем микроэлектроники.

Первая проблема – проблема изоляции элементов в ИМС в данном случае решена тем, что обеднённые носителями заряда рп переходы осуществляют изоляцию транзистора и остальных элементов схемы.

Вторая проблема – проблема расположения выводов решена тем, что в отличие от дискретного транзистора, все выводы коллектора, эмиттера и

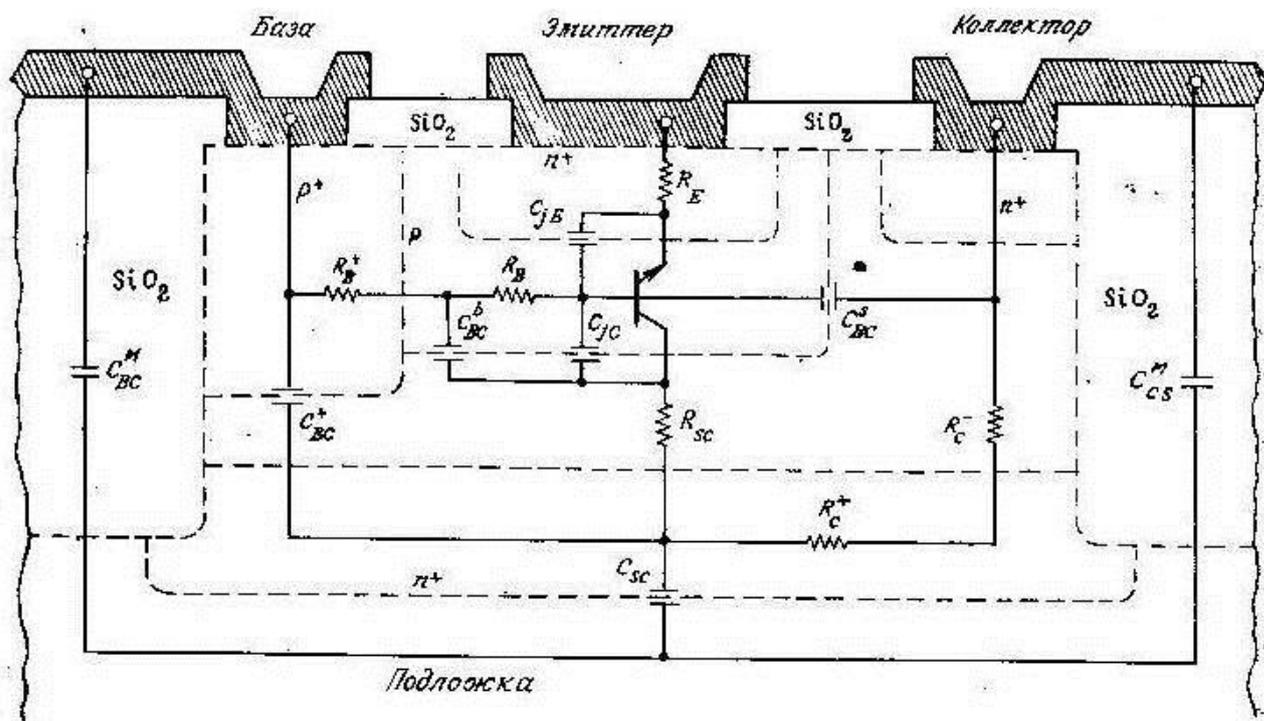
базы находятся на одной наружной стороне транзистора и могут входить в систему межсоединений схемы.

Проблема монолита решена тем, что все активные и пассивные элементы схемы созданы в едином объёме твёрдого тела, необходимость в большом количестве межсоединений может быть исключена путём схемной и физической интеграции.

### **Паразитные элементы в ИМС на основе планарно-эпитаксиальных диффузионных транзисторов**

Ряд существенных недостатков ИМС непосредственно связаны с основным активным элементом, и последовательное исключение этих недостатков определило развитие БТ в ИМС в течение более чем 15-ти лет. Легко видеть, что на рисунке 4 отображён не только создаваемый транзистор, но и ряд других приборов, создание которых не было целью разработки конструкции. К ним относится дополнительный т.н. паразитный транзистор типа ррр, в котором эмиттер - база основного транзистора, база - эпитаксиальный коллектор основного, а подложка играет роль паразитного коллектора. Ряд дополнительных паразитных ёмкостей образован рп- переходами, а сам полупроводниковый материал в ряде случаев создаёт дополнительные паразитные сопротивления. На рисунке 7 изображена схема, на которой приведён ряд паразитных элементов.

Введение скрытого высоколегированного слоя позволило существенно уменьшить дополнительное сопротивление коллектора. Велика составляющая ёмкости рп-перехода, образованного разделительной диффузией. Площадь перехода, а следовательно и ёмкость коллектор – база так же несравненно больше чем в аналогичном дискретном аналоге. Вторым существенным параметром, так же определяющим частотные характеристики, является сопротивление базы  $R_b$ . База в таком транзисторе состоит из активной части и сравнительно большой пассивной, протекание тока идёт вдоль тонкого слоя и сопротивление базы становится значительным. Как видно из рисунка 6, распределение примесей в базе приводит к возникновению встроенного электрического поля, ускоряющего перенос носителей через базу, сама база может быть весьма тонкой и предельная частота такого дрейфового транзистора в большей мере определяется временем заряда - разряда цепочки  $-R_b * C_k$ .



Элемент	Описание
$R_B$	Эффективное базовое сопротивление активного транзистора
$R_B^+$	Сопротивление пассивной базовой области
$R_C^+$	Сопротивление скрытого слоя в горизонтальном направлении
$R_C^-$	Сопротивление коллекторного эпитаксиального слоя в вертикальном направлении плюс сопротивление области коллекторного контакта
$R_E$	Эмиттерное сопротивление
$R_{SC}$	Сопротивление насыщения коллектора
$C_{BC}^b$	Емкость нижней части коллекторного перехода под пассивной базовой областью
$C_{BC}^+$	Емкость перехода между областью базового контакта и эпитаксиальной областью коллектора
$C_{BC}^s$	Емкость боковых участков перехода между пассивной базовой областью коллектора
$C_{BS}^M$	Емкость между металлизацией базы и подложкой
$C_{CS}$	Емкость между скрытым слоем и подложкой
$C_{CS}^M$	Емкость между металлизацией коллектора и подложкой
$C_{ES}^M$	Емкость между металлизацией эмиттера и подложкой (не показана)
$C_{jC}$	Емкость перехода коллектор – база активного транзистора
$C_{jE}$	Емкость перехода эмиттер – база активного транзистора

Рисунок 7. Основные паразитные элементы биполярного транзистора.

По мере уменьшения размеров сопротивление эмиттера относительно возросло. Наличие дополнительных сопротивлений естественно увеличивало энергию переключения. Снижение сопротивлений путём повышения концентрации носителей заряда в слоях – естественный путь, который также оказался за непродолжительное время исчерпанным. Нельзя повысить концентрацию в базе, не повысив её в эмиттере. Но повышение концентрации доноров в кремнии приводит к уменьшению ширины запрещённой зоны  $E_g$ . Падение  $E_g$  приводит к росту собственной концентрации, и так как  $n_p = n_i^2$ , то растёт концентрация неосновных носителей заряда и падает эффективность эмиттера. Удачным решением могло бы служить использование широкозонного эмиттера. Однако, подобрать материал, который удовлетворял всему комплексу требований планарной технологии, не удалось. Блестящим инвенторским шагом было

предложение не искать широкозонный эмиттер, а уменьшить ширину запрещённой зоны базы – например, оставив эмиттер кремниевым, а базу создавать в виде слоя сплава германий - кремний. Однако, и оно не выдержало конкуренции с другими решениями.

Платой за планарность, за возможность расположения всех выводов в одной плоскости стало ухудшение свойств такого транзистора в ИМС по сравнению с его дискретным аналогом.

Площадь, занимаемая разделительной диффузией весьма велика, она сопоставима и больше площади собственно транзистора. Большие по площади переходы приводят к значительным утечкам тока. В следствие изотропности диффузии её ширина не может быть меньше двух толщин эпитаксиального слоя, в ней должны расположиться два самых широких в схеме рп перехода. Разделительная диффузия стала тормозом в повышении плотности элементов в схеме и её быстродействия. Вывод контактов на одну плоскость и уменьшение размеров элементов привели к росту паразитных сопротивлений. Особую важность и в то же время сложность представила задача уменьшения сопротивления базы. Были необходимы новые решения. Эти решения возникли как реализация целенаправленно разработанных новых технологий – щелевой, ионного легирования, самосовмещения и технологии поликремния.

### БТ ИМС с комбинированной изоляцией

Замена изоляции элементов ИМС рп переходами, образованной разделительной диффузией, изоляцией, заполненными диэлектриком щелями, привела к существенному уменьшению паразитной ёмкости и позволила увеличить плотность элементов в схемах. Реализация такой структуры иллюстрируется рисунком 8.

Диэлектрическая проницаемость двуокиси кремния примерно в два раза меньше диэлектрической проницаемости кремния. Для реализации структуры, представленной на рисунке 8 оказалось необходимым повысить точность процессов эпитаксиального наращивания, травления, окисления, ионного легирования, литографии и однородность результатов каждой из операций по всей пластине.

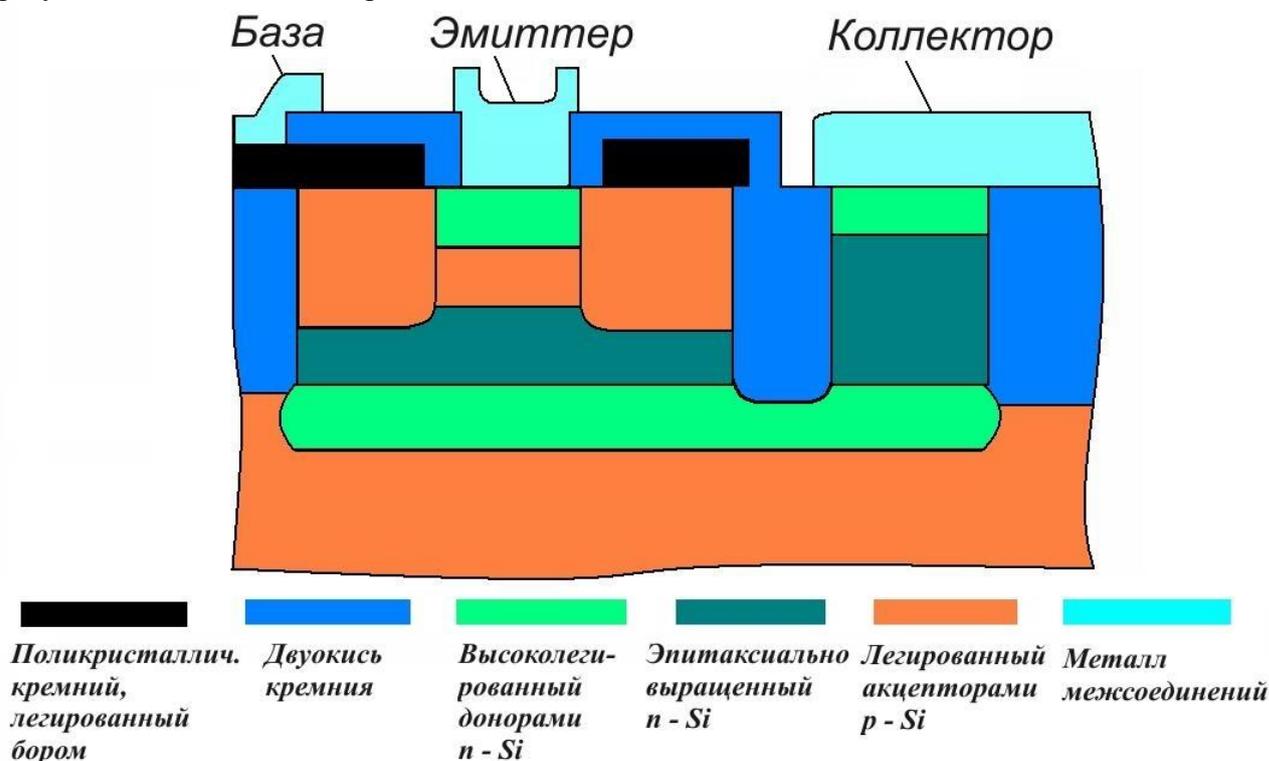


Рисунок 8. БТ в ИМС с областями из поликремния, выполненный по щелевой технологии, с использованием самосовмещения.

Особую роль сыграла технология поликристаллического кремния. Были разработаны методы осаждения высокоомного нелегированного поликристаллического кремния, легированного донорными и акцепторными примесями, методы его плазмохимического и химического травления и окисления. Разработана технология, позволяющая травить поликремний со скоростью, зависящей от его проводимости.

Совокупность этих работ подняла материальное производство на новый уровень. Впервые в истории материального мира была создана технология, позволяющая на основе одного и того же в своей химической основе вещества совместимыми технологическими процессами создавать объёмные структуры, образованные фактически различными материалами с необычайно широким спектром свойств. При этом такая технология по прецизионности геометрических размеров, состава и свойств так же не имеет аналогов в неорганическом мире.

Сказанное достаточно убедительно, на наш взгляд, иллюстрируется выборочной последовательностью операций изготовления транзисторов ИМС с комбинированной изоляцией, представленной на рисунке 9.

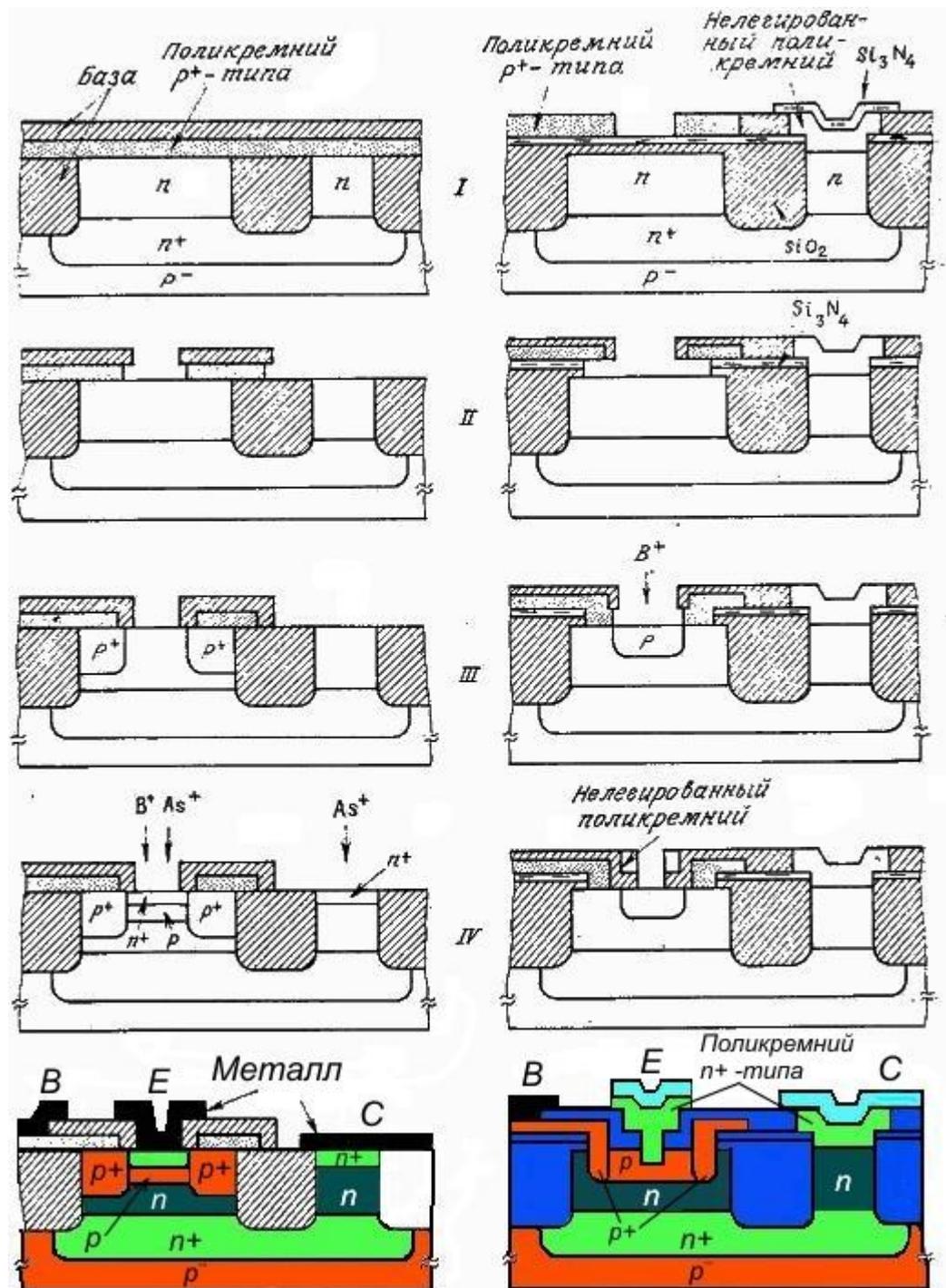


Рисунок 9. Последовательность операций изготовления транзисторов ИМС с комбинированной изоляцией.

Такие транзисторы в ИМС обладали рекордными для своего времени характеристиками. Были существенно уменьшены паразитные ёмкости и сопротивление базы ( $C_{bc} \approx 16 \text{ пФ}$  и  $R_B \approx 67 \text{ Ом}$ ). Это позволило получить тактовые частоты ИМС на уровне 17 ГГц, и задержку на вентиль в схемах с кольцевым генератором 30 пс.

Однако, критический взгляд на такие структуры, указывает на ряд дополнительных возможностей их улучшения. Так путь тока базы через карманы высоколегированного кремния неоправданно удлинён, что увеличивает  $R_B$ .

Этот недостаток был преодолён в ИМС на основе БТ с непосредственным контактом к активной области базы. Такая структура иллюстрируется рисунком 10, а последовательность ключевых технологических операций – рисунком 10.



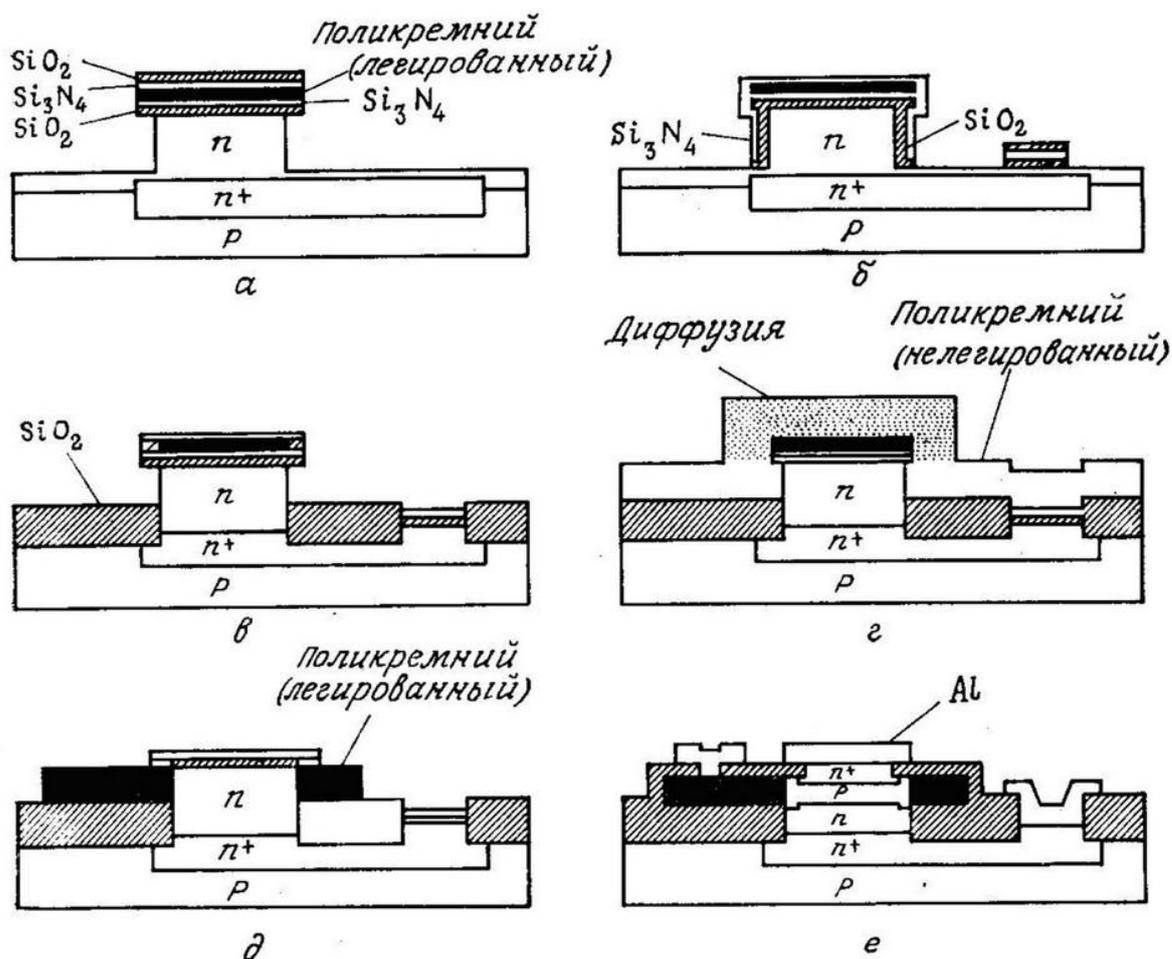


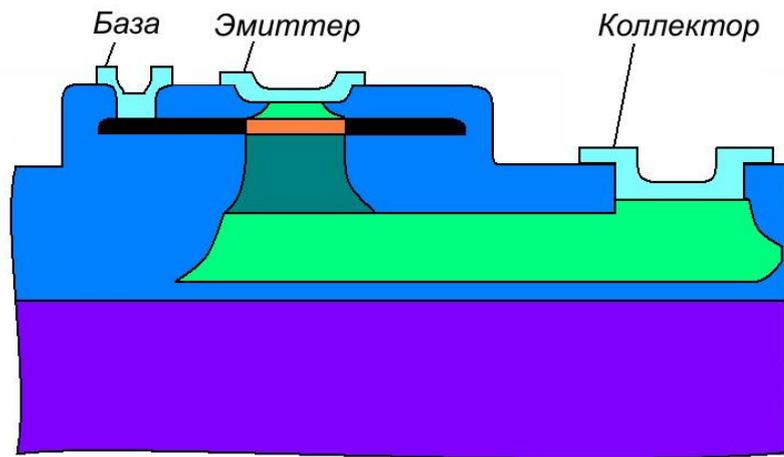
Рисунок 11. Последовательность ключевых технологических операций изготовления БТ с непосредственным контактом к базе.

Основой такого преодоления является овладение закономерностями кинетики изотропных и анизотропных процессов травления, наращивания и модификации.

## Структуры БТ в ИМС на основе технологии КНИ

Сопоставление структур, представленных на рисунках 10, 12, с позиций уменьшения паразитных элементов, показывает, что эти структуры позволили уменьшить паразитные ёмкости, образованные рп-переходами боковой разделительной диффузии. Однако, «донная» составляющая ёмкости, ёмкость изолирующего перехода между коллектором и подложкой, остаётся большой.

Были разработаны различные процессы создания изолирующей подложки (эпик – процессы, сапфировые и стеклянные подложки и др.) Но вследствие не обсуждаемых здесь причин они не получили практического воплощения к настоящему времени. Современное решение было найдено на основе технологии типа КНИ (кремний на изоляторе).



Металл межсоединений	Подложка	Поликристаллический кремний, легированный бором	Двуокись кремния	Высоколегированный донором n - Si	Эпитаксиально выращенный n - Si	Легированный акцепторами p - Si

Рисунок 12. БТ транзистор, выполненный по технологии кремний на изоляторе.

Технология КНИ – принципиальный прорыв. Она первой продемонстрировала возможности создания монолитной полупроводниковой ИМС, в которой разрешены обе базовые проблемы - проблемы расположения всех выводов транзистора в одной плоскости и проблема полной изоляции транзистора. Технология КНИ обеспечивает новые, весьма важные преимущества ИМС – существенно повышенную радиационную стойкость и снижение утечек тока через pn переходы, ликвидация эффекта «защёлкивания» в КМДП ИМС. До промышленного производства доведена технология SIMOX. Фирмы SOITEC (Франция), Ibis Technology Corporation (США) предлагают пластины КНД диаметром 100-200 мм, имеющие захороненный диэлектрик толщиной 0.08-0.4 мкм и приборный слой кремния 0.05-0.2 мкм с плотностью дислокаций  $1-5 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$ . Стоимость КНД структур составляет ~ US\$125 за пластины диаметром 100 мм, ~ US\$250 - 150 мм и свыше US\$500 за пластины 200 мм. Основные преимущества КНИ технологии реализованы в КМДП ИМС, поэтому эта технология будет более детально обсуждена в следующей главе.

### §2.3. Влияние уменьшения размеров

Повышение производительности ИМС – основная долговременная задача повышения их качества, решается на основе уменьшения размеров элементов.

Однако, уменьшение размеров, даже в областях размеров больших характеристических, приводит к появлению ряда новых связей и эффектов.

#### Влияние уменьшения размеров в плане

Рост сопротивления эмиттера  $R_e$  по мере уменьшения его площади приводит к росту необходимого времени для зарядки ёмкости  $C$  и вклада их произведения в общее время переключения. Это ограничивает рабочие частоты.

Дальнейший рост плотности тока вызывает появление падения напряжения вдоль базы в связи с неоднородным его распределением, вызванным влиянием боковых областей. Это приводит к появлению оптимума в зависимости граничной частоты от плотности тока.

По мере уменьшения размеров роль боковых участков базы возрастает. У боковых участков путь носителей больше, чем в центре (растёт «электрическая толщина базы»), что понижает коэффициент усиления.

Сильнолегированные области у базовых контактов являются источниками диффузии, что приводит к росту концентрации акцепторов в базе и снижению коэффициента усиления по току  $\beta$ .

Роль последних из указанных явлений практически снимается в структурах с самосовмещением.

Повышение плотности тока способствует электромиграции и падению надёжности.

Среди перечисленных явлений особо значимым и сложным в предотвращении является рост сопротивлений контактов. Чем меньше площадь, тем труднее очистить её от окислов и загрязнений и тем труднее осадить в ней равномерный слой контактного материала.

## **Влияние уменьшения размеров по вертикали**

По мере уменьшения размеров растёт прозрачность эмиттера – всё больше носителей, инжектированных из базы в эмиттер, достигают контакта, и ток эмиттера становится зависимым от скорости рекомбинации у контакта. Таким образом, возникает ещё один параметр, определяющий эффективность эмиттера.

По мере уменьшения толщины базы растёт роль флуктуаций в распределении концентрации акцепторов. В областях повышенной концентрации толщина базы уменьшается, и напряжение прокола падает. Возникает распределение транзисторов по напряжению прокола. Поэтому, концентрацию акцепторов в базе приходится понижать, в сравнении с оптимальной по расчёту электрических параметров.

По мере уменьшения толщины базы растёт вероятность возникновения проколов и замыканий из-за диффузионных трубок и пиков. Диффузионные трубки и пики возникают вследствие роста коэффициента диффузии вдоль дислокаций и дефектов.

Трубки ведут к замыканию, а пики к снижению напряжения прокола.

Таким образом, уменьшение размеров по вертикали приводит к существенному повышению требований к однородности легирования и структурному совершенствованию исходного материала. Становится очевидным требование к такой организации всего технологического процесса, при котором минимизировалось бы последующее диффузионное перераспределение.

## **Заключительные замечания**

Роль БТ в развитии ИМС трудно переоценить.

Вместе с тем, следует обратить внимание на ряд принципиальных недостатков использования БТ в ИМС. К ним можно отнести следующие:

- Необходимость изоляции. БТ в ИМС не самоизолирован. Поэтому плотность размещения элементов принципиально ограничена.
- БТ по своей природе - токовый прибор. Поэтому уменьшение размеров приводит к локальному повышению плотности тока и требует создания сложных токоподводов в схеме. Увеличение значений силы тока и его плотности является фактором, снижающим надёжность.
- Для БТ характерен низкоомный вход и высокоомный выход, что при прочих равных усложняет схемы необходимостью согласования.
- Токовая природа БТ делает практически невозможным создание энергонезависимых элементов и схем памяти на основе самих БТ.
- Защищённость рп переходов в БТ ИМС с одной стороны обеспечивает их защищённость от внешней среды, а с другой делает малоэффективными сенсоры сред на их основе.

Развитие микроэлектроники нуждалось в использовании принципиально другой элементной базы. Такую базу создали МДП-транзисторы, описанию эволюции которых посвящена следующая глава.

## Раздел 3. Эволюция МДП-транзисторов

Менее чем за 30 последних лет МДП-транзисторы (МДПТ) заняли доминирующее положение в современной электронике, вычислительной технике, информатике. Более 99% всех изготавливаемых в мире электронных приборов – практически МДПТ, В научно прогнозируемом будущем непрерывно и резко будет расти их абсолютное количество и доля в общем числе электронных приборов. Роль этих приборов в развитии микроэлектроники можно иллюстрировать следующим рисунком.

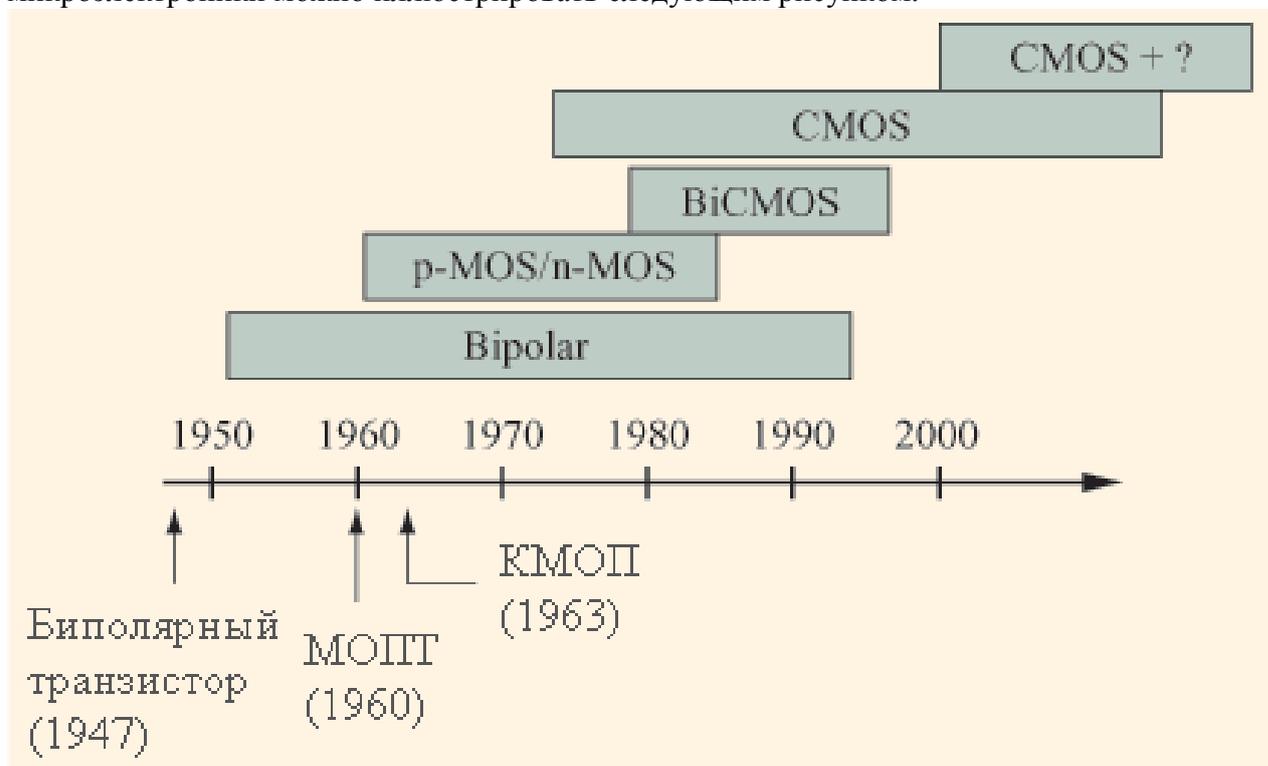


Рисунок 1. Применение БТ и МДП.

История развития выпуска МДПТ содержит весьма длительный латентный период. Если БТ для выхода в широкое массовое производство потребовалось менее 5-ти лет, то для полевых транзисторов, разновидностью которых являются МДПТ, этот период занял существенно больше 30 лет. Первый полевой транзистор был представлен к патентованию польско-американским учёным и изобретателем Юлием Лилиенфельдом в 1926-м году (рисунок 2, 3).



Рисунок 2. Юлий Лилиенфельд.

Jan. 28, 1930.

J. E. LILIENFELD

1,745,175

METHOD AND APPARATUS FOR CONTROLLING ELECTRIC CURRENTS

Filed Oct. 8, 1926

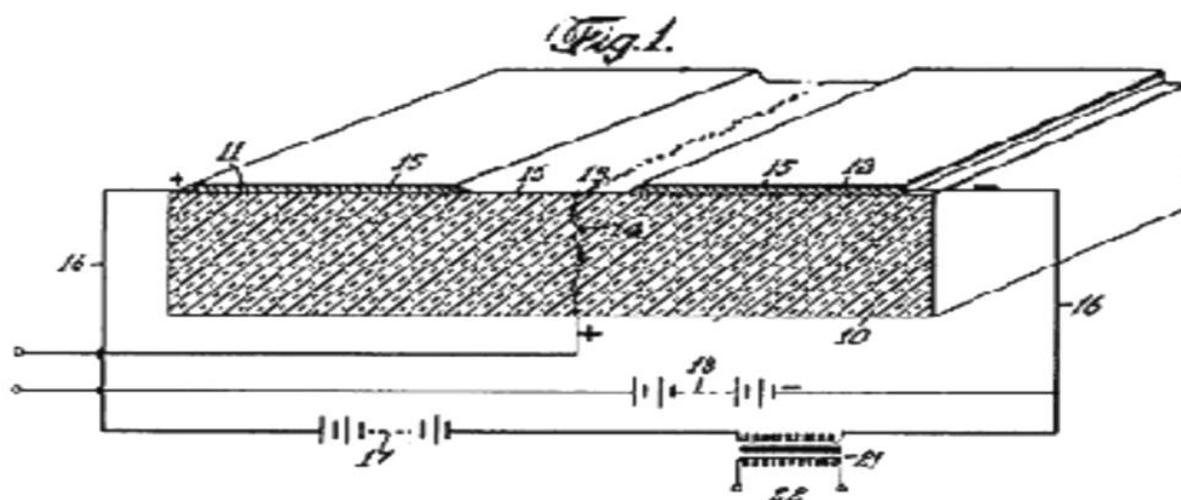


Рисунок 3. Страница патента Ю. Лилиенфельда (октябрь 1926 г.).

В 1935 году О. Хейл получил патент на полевой транзистор с тонким слоем полупроводника – полевой транзистор с изолированным затвором. В. Шокли в 1952-м году предложил полевой транзистор на основе обратного смещённого рп перехода в кремнии. С 1952 по 1960гг велись весьма интенсивные лабораторные разработки действующего образца полевого транзистора. В 1960 году Канг и Аталла продемонстрировали первый, успешно работающий МДП-транзистор. Почему же при гораздо более низком уровне знаний и технологии для освоения нового ранее не предсказанного БТ, его массовому производству и использованию потребовалось в 7 раз меньше времени, чем для МОП транзисторов? Хотя необходимость в них была осознанно велика, а количество разработчиков, привлечённых к решению этой задачи, было на порядки большим. С нашей точки зрения фундаментальное различие в том, что работа и параметры БТ определяются объёмными свойствами полупроводникового материала, а МДП не только и не столько объёмными, сколько поверхностными свойствами, свойствами интерфейсов полупроводникового материала и диэлектрика.

Рассмотрению эволюции МДПТ предшествует краткое элементарное напоминание связей его параметров со свойствами материалов и интерфейсов и топологией, не заменяющее необходимости более глубокого знания его работы и особенностей.

### §3.1. МДП-транзистор

**В основе действия МДПТ – эффект управляемого напряжением изменения типа проводимости тонкой приповерхностной области полупроводника у его границы с диэлектриком.** На рисунке 4 приведены энергетические зонные схемы, не находящиеся в контакте металла, диэлектрика и полупроводника. После приведения их в контакт обмен носителями заряда приводит к возникновению внутренних полей, изменению положения энергетических зон и их искривлению в областях контактов. В установившемся новом зонном спектре «общим знаменателем» является уровень Ферми. Это иллюстрируется рисунком 5.

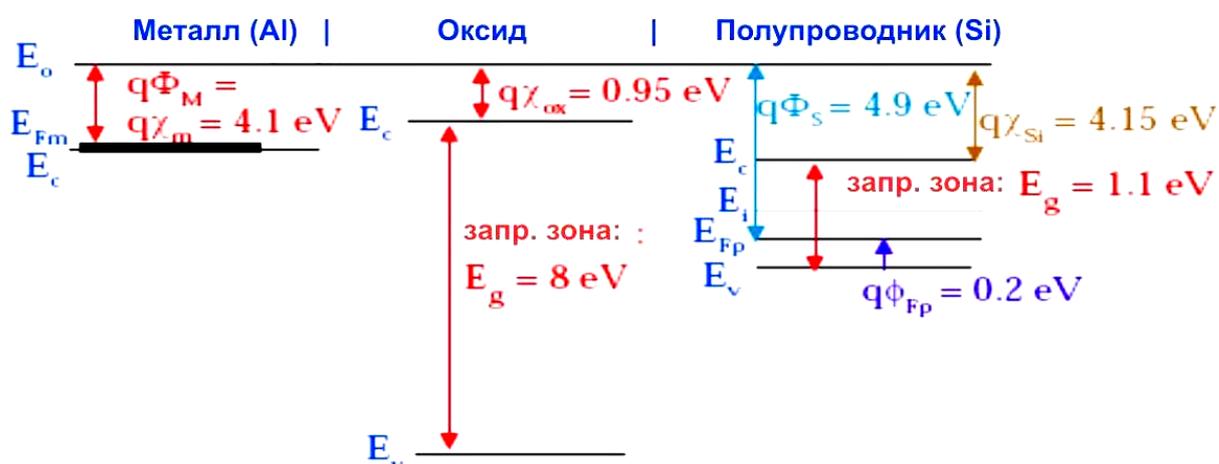


Рисунок 4. Зонная энергетическая диаграмма компонентов МДП до контакта.

Приложение разности потенциалов между металлом и полупроводником приводит к оттоку или накоплению носителей заряда у границы диэлектрика и полупроводника, изменению распределения электрического поля и соответствующему изменению изгиба зон. В области, в которой изменяется

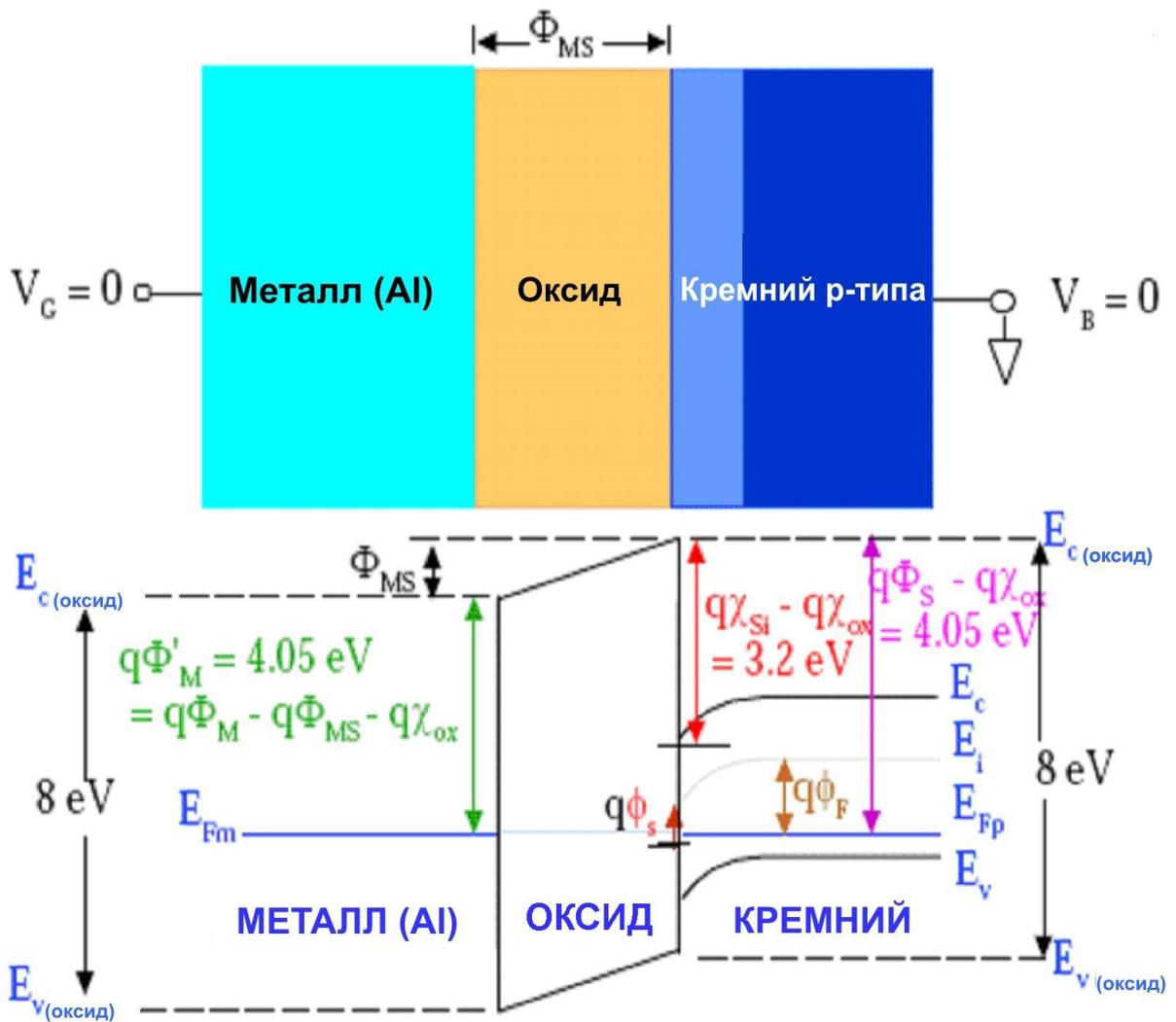


Рисунок 5. Зонная энергетическая схема МДП-структуры.

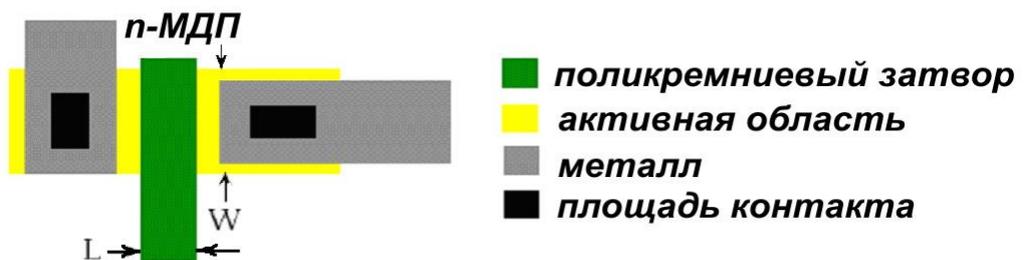
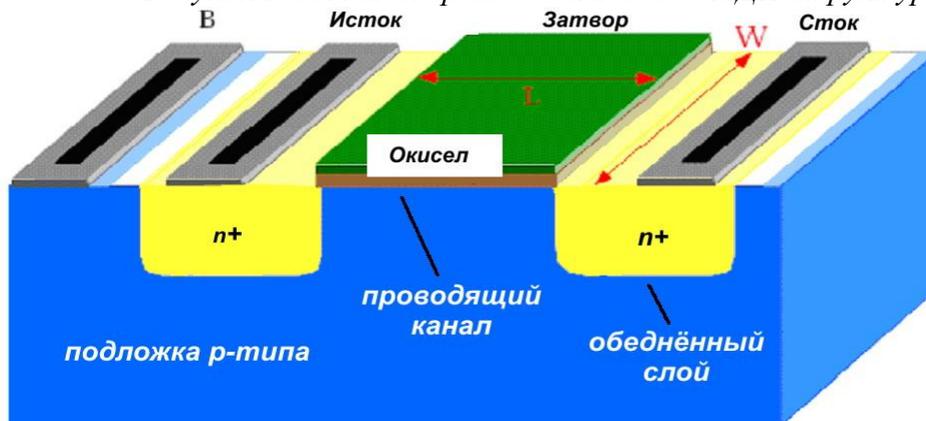


Рисунок 6. МДП-транзистор с обогащенным n-каналом.

положение уровня Ферми относительно середины запрещённой зоны, изменяется тип проводимости.

Это приводит к возникновению или исчезновению тонкого слоя полупроводника противоположного основному объёму по типу проводимости. Например, в *n* материале возникает канал с дырочной проводимостью.

МДП-транзистор схематически изображён на рисунке 6. В основном исходном материале (базе, кармане, подложке) созданы две близко расположенные высоколегированные области противоположного типа проводимости (области истока и стока). Между ними на поверхности создаётся тонкий слой диэлектрика, на который наносится металлический слой или слой высокопроводящего поликремния (затвор).

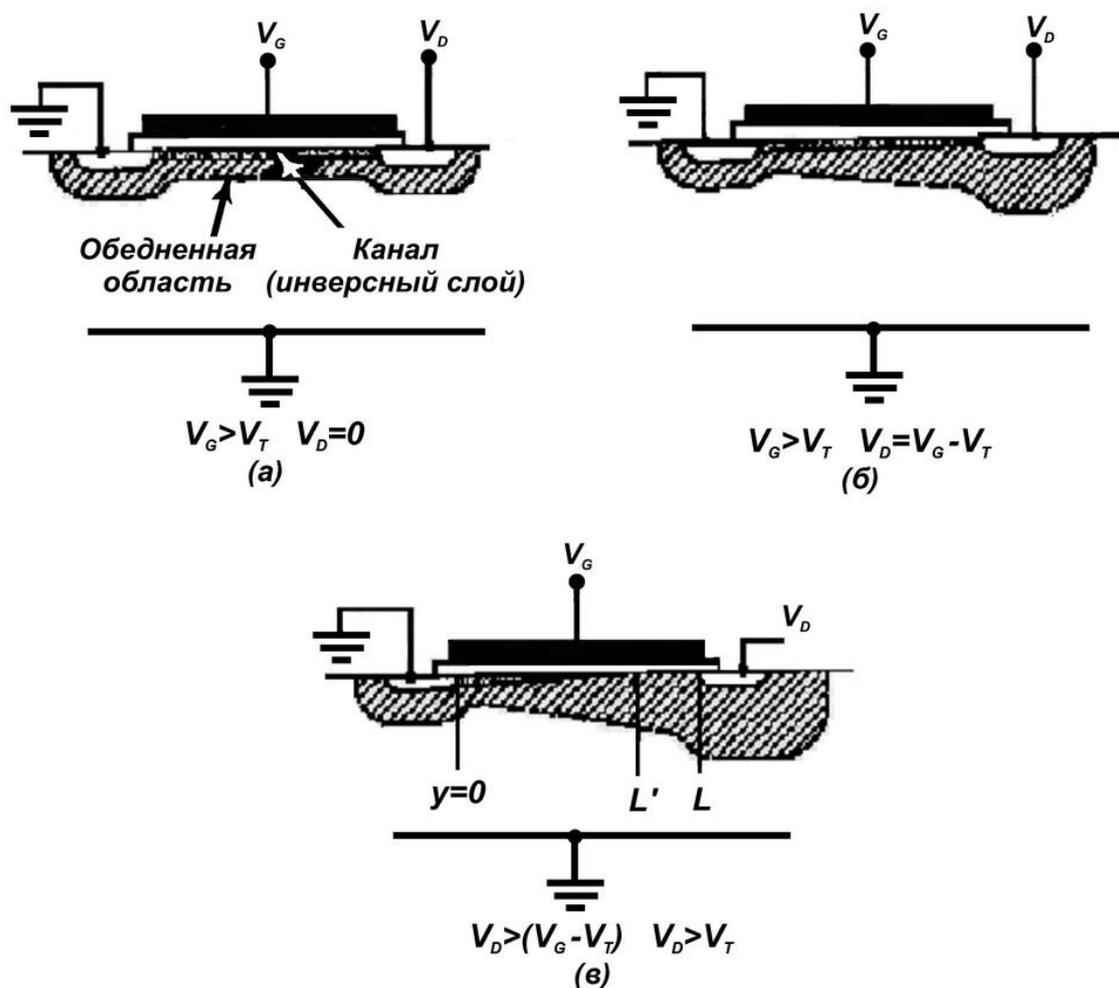


Рисунок 7. Сечение МОП-транзистора, иллюстрирующее влияние напряжения смещения на конфигурацию обедненной области: а – малое стоковое напряжение, обедненная область почти однородна по всей длине канала, б - более высокое стоковое напряжение, достаточное для значительного изменения толщины обедненной области по длине канала, в - стоковое напряжение превышает напряжение насыщения, канал доходит только до  $L' < L$ .

Исток и сток снабжаются омическими контактами. Создаётся омический контакт к базе и затвору. Области истока и стока отделены друг от друга и основного материала образовавшимися рп переходами.

Если подать достаточное напряжение между затвором и базой, то можно изменить тип проводимости в тонком слое между ними и создать, таким образом, проводящий канал между истоком и стоком.

Изменение напряжения между истоком и стоком при открытом канале – при напряжении на затворе выше порогового, приводит к изменению тока, а падение напряжения,

вызванного этим током, меняет изгиб зон в области стока, что приводит к сокращению длины канала, как это иллюстрируется на рисунке 7. Устанавливается динамическое равновесие, возрастает роль второго слагаемого в формуле для тока и ток насыщается. Типичные исток – стоковые характеристики приведены на рисунке 8.

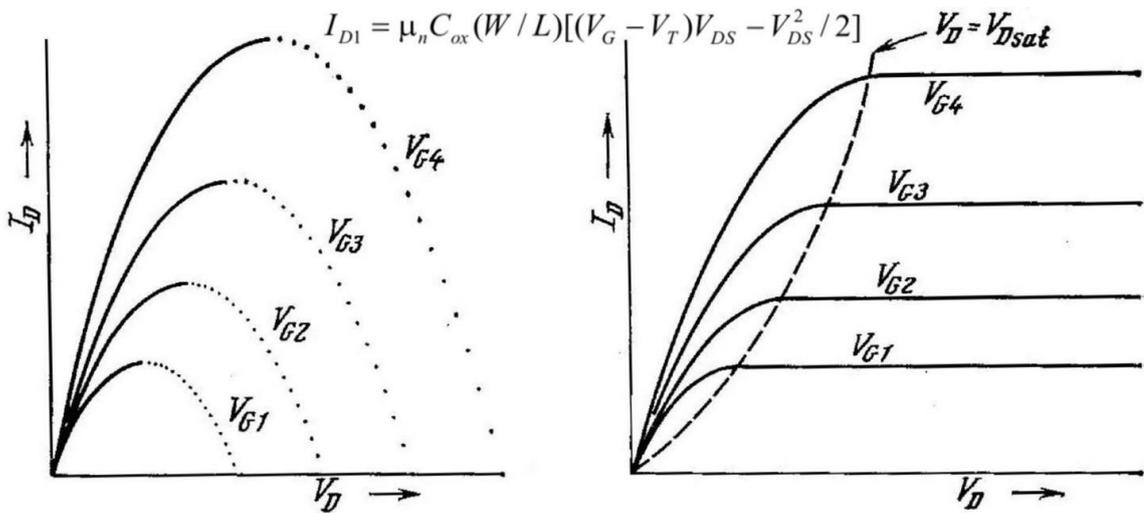


Рисунок 8. Исток - стоковые характеристики МДП-транзистора.

Ниже приведено упрощенное краткое описание, связывающее основные параметры МДПТ - время пролёта носителей от истока к стоку –  $\tau$ , ток между истоком и стоком при открытом канале -  $I_{uc}$ , пороговое напряжение -  $V_n$ , ёмкость –  $C$ , со свойствами материалов и топологией – подвижностью носителей заряда в канале –  $\mu$ , диэлектрической проницаемостью подзатворного диэлектрика.

Пороговое напряжение определяется не только объёмными свойствами материалов, но и свойством интерфейса диэлектрик-полупроводник – плотностью поверхностных состояний  $N_{ss}$ , создающей заряд  $Q_{ss} = q \cdot N_{ss}$ .

Величина и постоянство этого заряда, как и заряда, встроенного в диэлектрик  $Q_{встроен}$  приводит к стабилизации заданного значения важнейшего параметра МДПТ – порогового напряжения. Легко видеть, необходимость минимизации  $N_{ss}$ . Таким образом, необходимым условием создания ИМС на основе МДПТ, являлось достижение нового уровня в овладении технологией неоднородных структур. Источники заряда и типы зарядов в структуре полупроводник – диэлектрик многообразны, это иллюстрируется рисунком 9.

$I = \partial Q / \partial t; I = Q / t;$	(3.1)
$Q = C(V_3 - V_n); C = \epsilon_D * \epsilon_0 * W * L / d_D$	(3.2)
$\tau = L / v; v = \mu * E; v = \mu V_{uc} / L;$	(3.3)
$\tau = \frac{L^2}{\mu V_{uc}}; I_{uc} = \frac{C(V_3 - V_n)}{L^2} \mu V_{uc};$	(3.4)
$I_{uc} = \frac{\epsilon_D * \epsilon_0 * W \mu [(V_3 - V_n) V_{uc} - V_{uc}^2]}{L * d_D};$	(3.5)
$I_{uc} = \frac{\epsilon_D * \epsilon_0 * W (V_3 - V_n)}{L * d_D} \mu V_{uc};$	(3.6)
$S = \frac{\partial I_{uc}}{\partial V_3}; \sigma = \frac{\partial I_{uc}}{\partial V_{uc}};$	(3.7)

$$V_n = \varphi_{\text{ин}} + 2V_p - \frac{Q_{\text{ss}} + Q_b}{C} + \frac{Q_{\text{встр}}}{C}$$

(3.8)

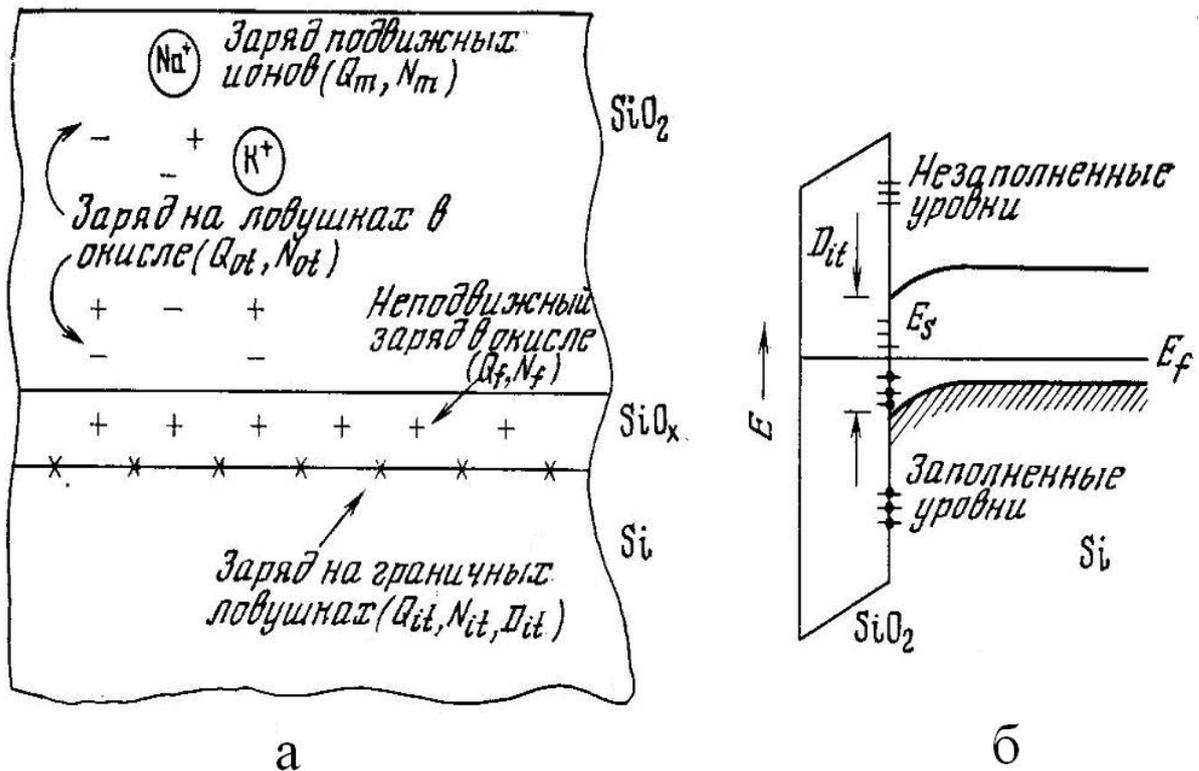


Рисунок 9. Источники и типы зарядов в структуре полупроводник-диэлектрик. а – четыре типа зарядов в окисле в МОП-структурах. б – энергетические уровни на границе окисел – кремний.

До тех пор пока не была разработана технология создания структур Si – SiO<sub>2</sub> со стабильно малой плотностью поверхностных состояний и практически свободных от подвижных зарядов в окисле и заряда на ловушках, МДПТ не могли воспроизводимо создаваться и использоваться. Решение этой задачи заняло более 15-ти лет. В результате были разработаны процессы создания структур с  $N_{\text{ss}} < 2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , в которых не было подвижных ионов и управляемо ионным легированием создавались заданные концентрации встроенных неподвижных зарядов в окисле. Чтобы представить сложность создания интерфейса с  $N_{\text{ss}} < 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  можно сопоставить эту величину с плотностью оборванных связей на идеальной поверхности кремния. При объёмной плотности атомов  $5 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$  плотность оборванных связей  $2 \cdot (5 \cdot 10^{22})^{2/3} = 2.76 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Таким образом, в таких структурах лишь одна из 100000 оборванных связей может остаться заряженной. Допустимое значение плотности поверхностных состояний, например, сопоставимо и меньше количества примесных атомов на единице поверхности при малом уровне легирования  $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Создание заданных концентраций встроенных неподвижных зарядов в окисле ионным легированием позволило управлять пороговым напряжением. Управление зарядом в диэлектрике позволило создать элементы и схемы памяти. Таким образом, окисление кремния, не только привело к планарной технологии, но и явилось основой того класса приборов, который стал краеугольным камнем развития микроэлектроники в течение прошедших лет и в зримом будущем.

Анализ соотношений, приведенных выше, показывает определяюще важную роль расстояния между истоком и стоком – т.н. длины затвора – L, в совершенствовании параметров МДП-транзисторов. Быстродействие транзистора обратно квадрату длины затвора. Эта величина фактически является топологической нормой, и её уменьшение

ведёт к резкому повышению плотности элементов в схеме. Как показано в 1-ой главе ещё более существенно растёт производительность ИМС. Ток в канале, крутизна транзистора и проводимость между истоком и стоком обратно пропорциональны длине канала. Энергия переключения также снижается по мере уменьшения  $L$ . Длина затвора стала важнейшим параметром, количественно определяющим уровень технологии.

**Роль подвижности носителей заряда в канале** следует из приведенных соотношений – рост подвижности улучшает быстродействие транзистора, его крутизну, проводимость канала. Следует обратить внимание на то, что подвижность носителей заряда в канале значительно меньше подвижности в таком же по составу монокристаллическом материале. Проблема повышения подвижности носителей заряда в канале особенно важна при создании самых распространённых в настоящее время схем - комплементарных схем, в которых быстродействия р- и n-канальных МДП-транзисторов целесообразно иметь высокими и равными.

**Ряд параметров транзистора – ток исток – сток, проводимость канала, крутизна транзистора улучшаются при увеличении подзатворной ёмкости.** Этому способствуют уменьшение толщины диэлектрика, увеличение его диэлектрической проницаемости и площади затвора. Эти резервы ограничены.

Уменьшение толщины окисла, в обычных транзисторах меньшей десятка нанометров, приводит к росту предпорогового тока, резкому увеличению потребления энергии, потере надёжности. Следует учитывать, что электрическое поле в диэлектрике близко к  $10^7$  В/см. Увеличение диэлектрической проницаемости простой заменой, например, окисла кремния его нитридом, порождает ряд трудно разрешимых проблем, в том числе проблему плотности поверхностных состояний.

**транзистор в ИМС находится в монолите. Это приводит к появлению ряда дополнительных связей. В отличие от БТ МДП-транзистор может быть самоизолированным.** Исток и сток изолированы от базового материала рп переходами, а затвор – диэлектриком. Расстояние между отдельными транзисторами, существенно большее длины канала, обеспечивает отсутствие паразитных связей. Однако, важную роль во взаимосвязях играют межсоединения. **Сопровождающие контакты и ёмкости линий являются по существу паразитными элементами, роль которых только возрастает по мере уменьшения размеров элементов.**

Следует обратить внимание на то, что изменения в транзисторе взаимосвязаны так, что изменение одного элемента приводит к необходимости изменения других и изменению ряда выходных рабочих параметров. Поэтому целесообразно подходить к оптимизации на основе анализа работы МДПТ в ИМС.

### ***§3.2. Основные применения МДПТ в ИМС***

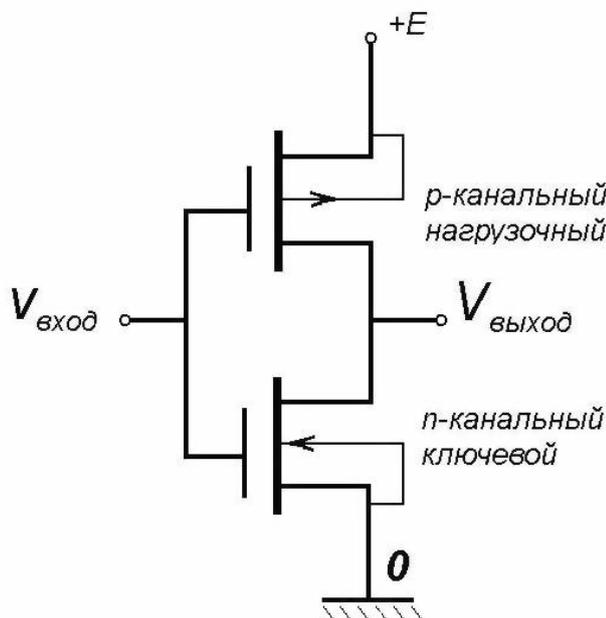
**МДПТ уникален тем, что является основой 3-х основных задач получения и обработки информации – сенсорики (получения данных), аналоговой и цифровой обработки, запоминания и воспроизведения данных. Причём в реализации всех 3-х задач структуры МДП занимают в настоящее время ведущие позиции.**

#### ***3.2.1. МДП и КМДП в логических элементах***

В аналоговой и цифровой обработке данных МДПТ прошли путь от классического использования в качестве ключевых элементов, сопряжённых с пассивными нагрузочными, к совместному использованию с биполярными транзисторами и к безраздельному заполнению логических элементов комплементарными МДП транзисторными структурами. Это хорошо иллюстрируют рисунок 1, отображающий роль КМДП в недавнем прошлом и в научно прогнозируемых ближайших десятилетиях. Поэтому ниже основное внимание будет уделено КМДП структурам.

КМДП структура состоит из двух транзисторов с различным типом проводимости в каналах. Транзисторы подсоединены к источнику питания, входу и выходу так, как это изображено на рисунках 10, 11.

Стоки р-канального (т.н. нагрузочного) и п-канального (ключевого) соединены и образуют выход схемы. Истоки закорочены на базовые области (п область у р-канального, и р у п-канального). Затворы имеют общий вывод – вход схемы.



Вход	$R_{нагрузочного}$	$R_{ключевого}$	Выход	$R_n + R_k$	Потребление
0	0	$\infty$	+E	$\infty$	0
+U > Un	$\infty$	0	0	$\infty$	0

Рисунок 10. Комплементарная МДП-структура из 2-х транзисторов.

При подаче на вход напряжения ниже порогового (0 для определённости) между базовым материалом р-канального транзистора и затвором оказывается приложенное напряжение, открывающее этот транзистор, и оставляющее п канальный в закрытом состоянии. Потенциал источника питания (+E) практически полностью передается на выход схемы. При подаче на вход напряжения выше порогового, на выходе – 0.

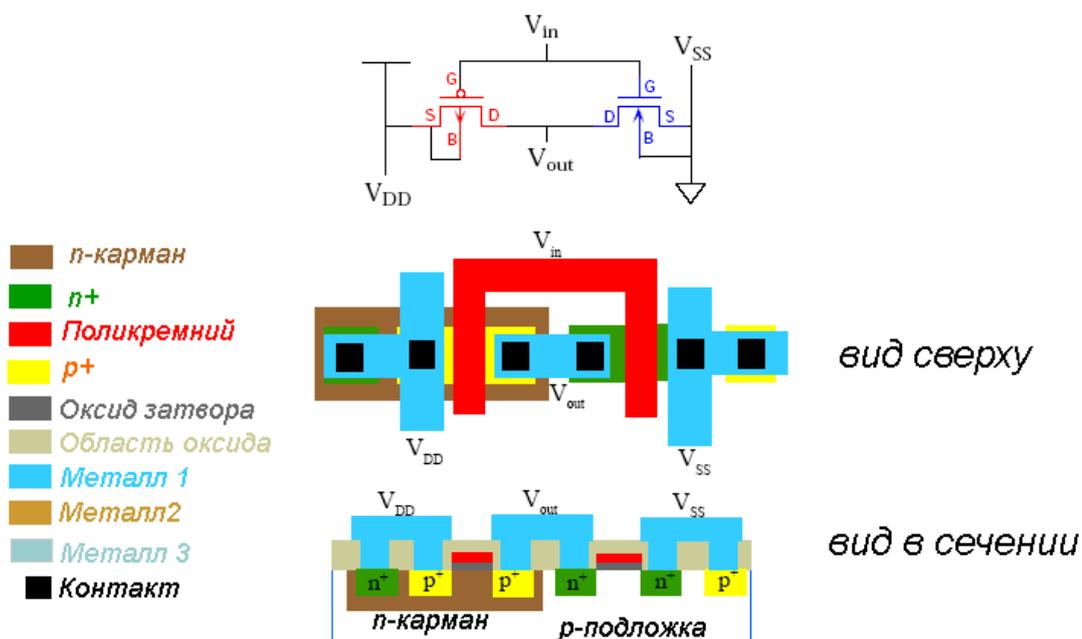


Рисунок 11. Комплементарная МДП-структура.

Таким образом, КМДП схема обладает следующими основными положительными свойствами.

- Схема осуществляет логическую операцию – инвертирование.
- В любом из состояний потребление энергии минимальное, оно определяется высоким сопротивлением канала закрытого транзистора.
- На выходе размах напряжения при переключении практически равен напряжению источника питания.
- При создании схем из КМДП переключение осуществляется током открытого транзистора, что способствует увеличению быстродействия.
- КМДП схема самоизолирована, что способствует увеличению плотности размещения элементов.

Указанные качества обеспечили широкое использование КМДП схем в ИМС. Совершенствование КМДП структур один из основных путей развития микроэлектроники в настоящем и зримых последующих периодах. Основным элементом таких схем являются МДП-транзисторы, и их развитие определяет совершенствование КМДП структур и ИМС на их основе.

Прогнозы основных направлений развития и ожидаемые параметры МДП на ближайшую и отдалённую перспективу вырабатываются ежегодно большим коллективом специалистов всего мира и представляются ITRS. В 2007 г опубликованы прогнозы развития до 2015г и до 2022г соответственно.

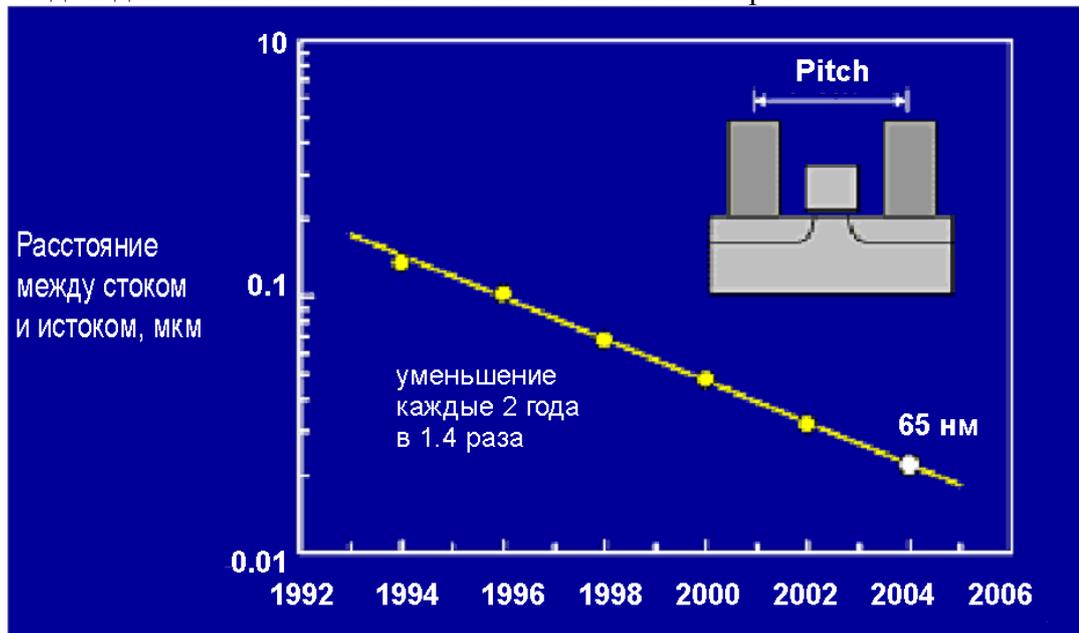
### 3.2.2. Основные направления совершенствования МДП и КМДП для

#### логических схем

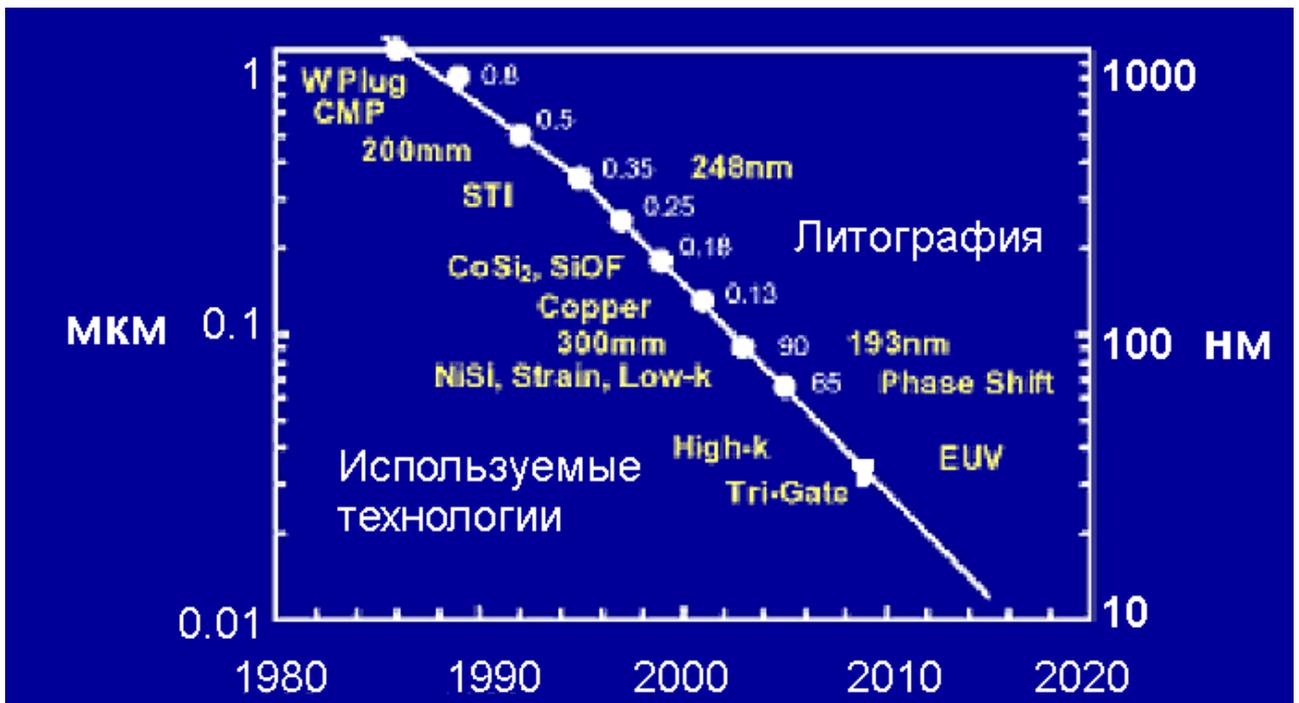
Анализ развития ИМС позволяет указать следующие направления совершенствования МДП и КМДП:

1. Уменьшение длины канала.
2. Повышение подвижности носителей заряда в канале.
3. Снижение токов утечки и повышение подзатворной ёмкости. Повышение диэлектрической проницаемости подзатворного диэлектрика и снижение сопротивления металлизации к затвору.
4. Снижение сопротивления металлизации контактов к истоку и стоку.
5. Создание ультратонкой полностью обеднённой базы.
6. Снижение паразитных ёмкостей и вероятности эффекта защёлки. Использование структур КНИ и КННЧ.
7. Создание многозатворных транзисторов.
8. Использование баллистического переноса.
9. Реализация новых принципов и механизмов создания логических элементов.

**Ведущим является уменьшение длины канала.** Это приводит к росту не только основных функциональных параметров не только отдельного транзистора, но и к практическому квадратичному увеличению плотности элементов в ИМС, производительности ИМС и снижению стоимости оборудования для производства миллиона операций. На рисунке 12 отображена динамика изменения размеров элементов в ведущей фирме Интел за последние десятилетия. Расстояние между стоком и истоком транзисторов (так называемый pitch) уменьшается в 1.4 раза каждые два года и для 65-нм технологии составляет 220 нанометров.



(a)



(б)

Рисунок 12. Динамика изменения размеров элементов: а – уменьшение расстояния между стоком и истоком, б - использование различных технологий изготовления транзисторов.

**Подвижность носителей заряда в канале непосредственно определяет быстродействие транзистора.** Подвижность носителей заряда в канале обычных транзисторов ниже подвижности в таком же но монокристаллическом материале в 1.5 -2 раза и возможности её повышения улучшением технологии обработки пришли к насыщению. **Революционным шагом оказалось изменение зонной энергетической структуры канала, приводящее к увеличению подвижности носителей заряда.** Увеличение подвижности может быть достигнуто или путём уменьшения эффективной массы носителей заряда при постоянном времени релаксации их импульса или снижением рассеяния, приводящему к увеличению времени релаксации. Обе эти возможности **были реализованы путём создания каналов с заданными механическими напряжениями в кремнии.** Изменение зонной структуры р и n кремния при механическом напряжении иллюстрируются рисунками 13,14.

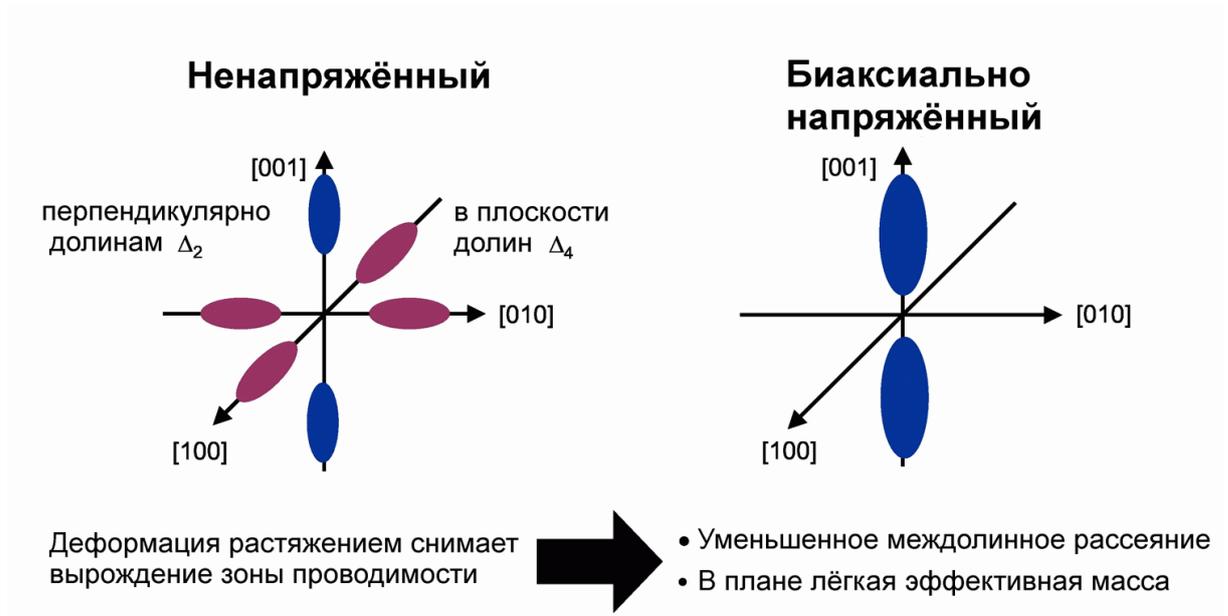


Рисунок 13. Влияние механических напряжений на энергетический зонный спектр *n* кремния и факторы повышения подвижности.

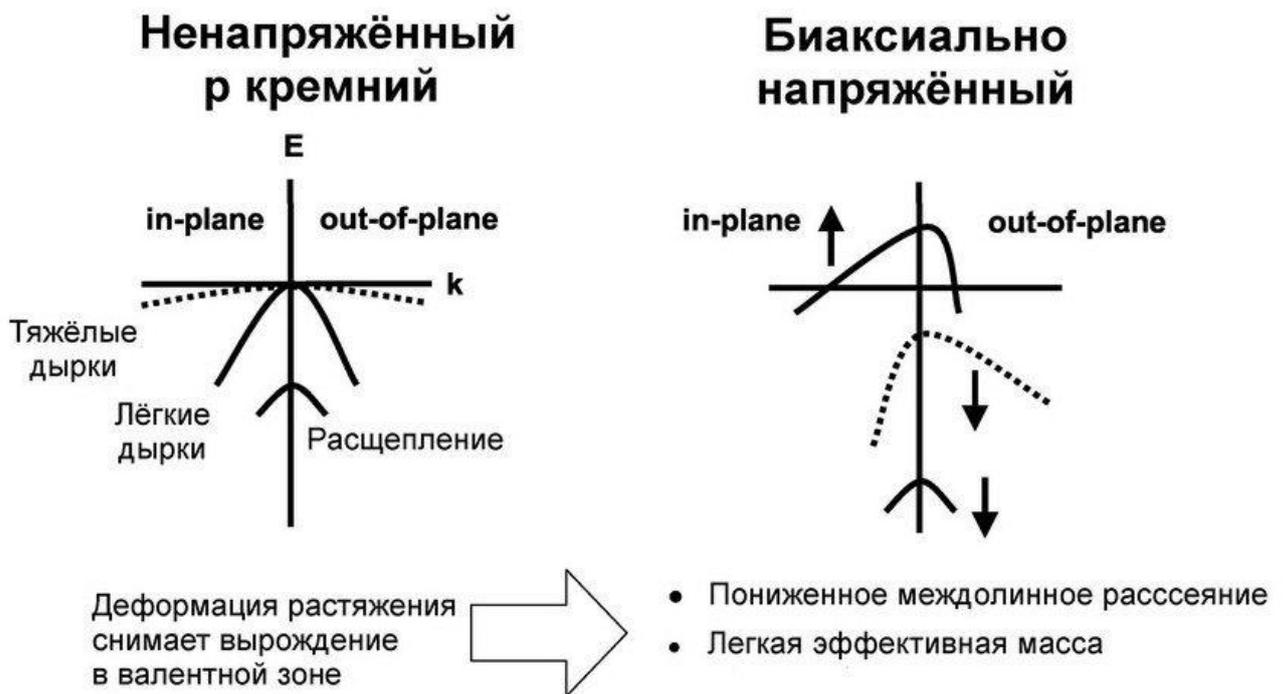
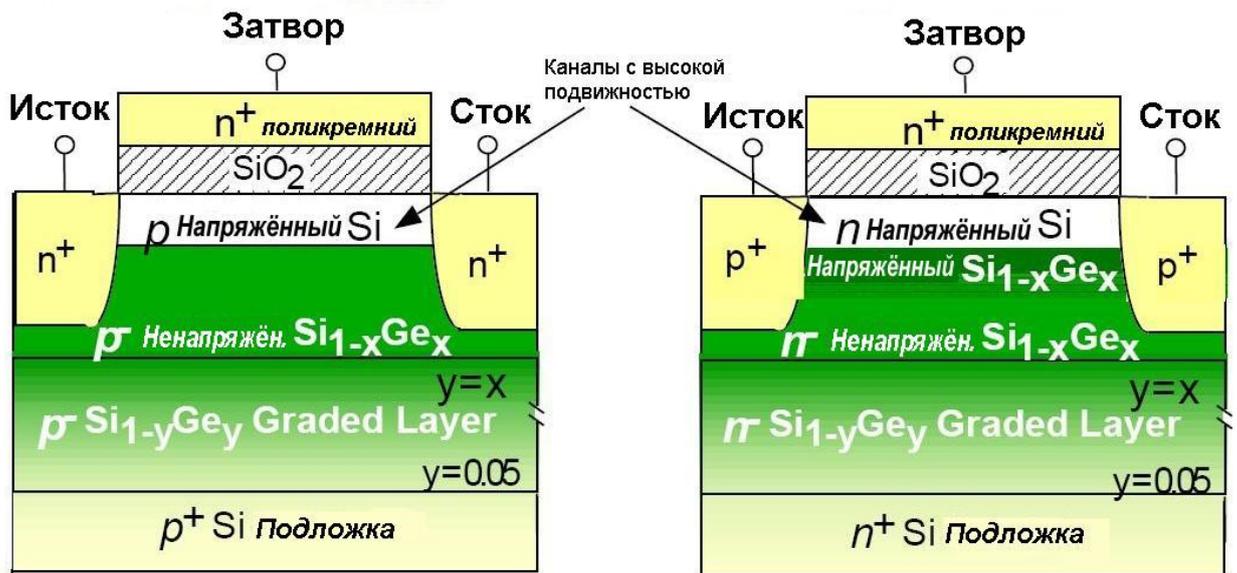


Рисунок 14. Влияние механических напряжений на энергетический зонный спектр *p* кремния и факторы повышения подвижности.

В напряженных слоях кремния увеличению подвижности способствуют оба фактора. Подвижность существенно возрастает, что отображено на рисунке 14. Структуры с напряжёнными слоями кремния создаются за счёт несоответствия постоянных решётки эпитаксиальных кремниевых слоёв и слоёв кремний – германий. Вначале осаждаются слои с переменной возрастающей концентрацией германия. Это переходные напряжённые буферные слои поверх них осаждаются ненапряжённые слои с таким же заданным содержанием германия, что и в вершине буферного слоя. Это обеспечивает отсутствие напряжений и структурное совершенство слоёв, на которые наносят эпитаксиальные слои кремния. В слоях кремния создаются заданные механические напряжения. Структуры для *n*- и *p*-канальных транзисторов несколько различны, что видно на рисунке 15.



$p\text{-Si}_{1-y}\text{Ge}_y$  Graded Layer - слой с переменным составом  $y$

Рисунок 15. Структуры  $n$ - и  $p$ -канальных транзисторов.

Применение напряжённых слоёв позволяет существенно до 1.5- 2 раз повысить быстродействие транзисторов и схем и токи в открытом состоянии. Однако их широкое использование сопряжено с необходимостью преодоления ряда трудностей, связанных с введением новых процессов и совместимостью с ультратонкими основаниями (базовыми слоями) в структурах КНИ (кремний на изоляторе).

*Снижение токов утечки и повышение подзатворной ёмкости. Повышение диэлектрической проницаемости подзатворного диэлектрика и снижение сопротивления металлизации к затвору.*

Уменьшение длины затвора влечёт за собой уменьшение и толщины слоя диэлектрика. В противном случае изменяется картина электрического поля в структуре и резко падает ёмкость. В соответствии с приведенными выше соотношениями это ведёт к снижению тока в открытом состоянии, проводимости канала и крутизны. Но уменьшение толщины слоя диэлектрика приводит к экспоненциальному росту вероятности туннелирования через него и к росту тока утечки. В поликремниевом затворе растёт толщина обеднённого слоя, что ведёт к снижению ёмкости. Эти явления особенно нежелательны при использовании в схемах автономного пользования и в конечном итоге снижают основные функциональные характеристики ИМС. Выходом из сложившейся ситуации явилось создание и использование структур со слоями диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью. Пример такой структуры приведён на рисунке 16.

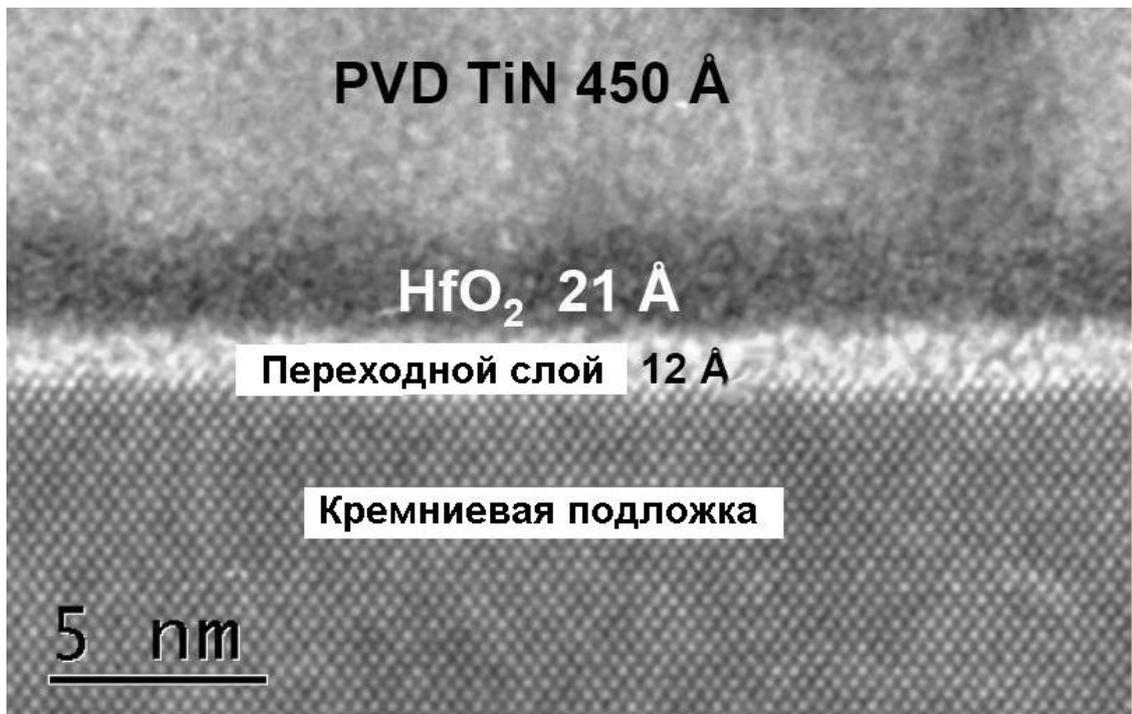
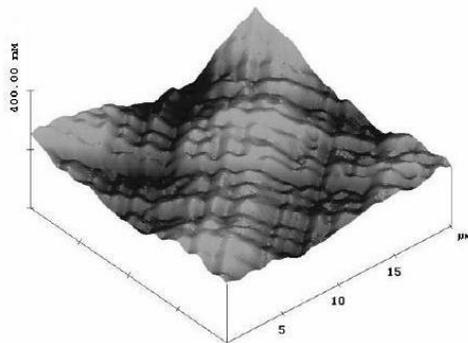
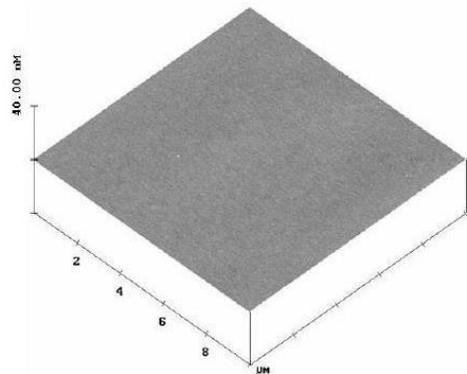


Рисунок 16. Электронная микроскопия структуры с эффективной диэлектрической проницаемостью диэлектрических слоёв двуокиси гафния и переходного слоя  $\approx 13.5$  и нитридтитановым слоем металлизации к затвору.

Диэлектрик должен удовлетворять ряду требований – технологическая совместимость с процессом изготовления ИМС, заряд и плотность поверхностных состояний на границе раздела с кремнием, стабильность при температурных обработках, совместимость с материалом и процессом вывода затвора. Так же велик перечень требований к материалу вывода затвора. Поэтому подбор материалов и процессов их нанесения проводится целенаправленно и взаимосогласовано. Разность работ выхода в n и p канальных транзисторах при использовании одного и того же металла оказывается различной, использование различных металлов, например, в КМДП структурах существенно усложняет процесс. Поэтому ищутся пути управления работой выхода, например имплантацией азота в молибден. Эффективная толщина получающегося диэлектрического слоя определяется диэлектрическими проницаемостями обеднённого слоя в контакте, самого диэлектрика и переходного слоя у поверхности кремния. Следует иметь в виду трудности масштабируемости свойств подзатворного диэлектрика в таких структурах. Переходные ангстремовые слои неоднородны по составу, а свойства структуры при таких толщинах слоёв определяются не только свойствами каждого слоя в отдельности, но и их взаимодействием. Особую роль играет в создании таких структур подготовка поверхности. Достигнутый уровень иллюстрируется рисунком 17.



**Шероховатость перед химико-механической полировкой 30-50 ангстрем**



**Шероховатость после химико-механической полировки < 2 ангстрем**

*Рисунок 17. Среднеквадратическая шероховатость после химико-механической полировки становится меньшей 2-х ангстрем.*

*Роль паразитных элементов увеличивается по мере уменьшения размеров*

Сопротивление контактов к истоку и стоку увеличивается по мере скейлинга и становится причиной задержки в обработке сигнала. Поэтому от удобного технологически высоколегированного поликремния переходят к металлическим контактам и межсоединениям. Технология многослойных контактов позволяет использовать высокопроводящую медь при надёжной защите от её проникновения в полупроводниковые области и последующей модификации взаимодействием с соседями и окружающей средой.

МДП-транзисторы в ИМС, как и биполярные, обладают рядом паразитных элементов и связей. Паразитные сопротивления контактов и «не рабочих областей» истока и стока, паразитные ёмкости и наибольшая среди них ёмкость между эпитаксиальными слоями в карманах полупроводникового материала противоположного типа проводимости. В КМДП схемах образуется система рп переходов, подобная тиристору. Это может приводить к т.н. эффекту защёлки, при котором структура переключается в проводящее состояние.

**Кардинальным выходом является использование в качестве базовых тонких слоёв полупроводникового материала, отделённого от подложки слоем диэлектрика.** Структуры кремний на изоляторе (КНИ), или структуры, в которых изолятором является воздушный зазор – структуры кремний ни на чём (КННЧ) могут образовываться ионным внедрением кислорода с последующим отжигом, жертвенным травлением, использованием пористого кремния и, или, развитым латеральным ростом.

Уменьшение длины канала приводит к росту влияния флуктуаций концентрации примесей в базовом полупроводниковом материале. Флуктуация в концентрации примеси вызывает изменение толщины и заряда обеднённого слоя и в соответствии с приведенным выше соотношением для порогового напряжения ведёт к его изменению. **Выходом из этой ситуации является использование столь тонкого слоя базового материала, чтобы он был полностью обедненным.**

На рисунке 18 схематически изображены 3 структуры с различными толщинами базового материала и областями обеднения. Структура КНИ с полностью обеднённым слоем обладает рядом преимуществ – пониженные паразитные ёмкости, нет эффекта защёлки, нет влияния флуктуаций примеси на пороговые напряжения. Однако, в этой структуре возрастают фактически паразитные сопротивления истока и стока, становится существенным обеспечение заданной толщины полупроводникового слоя. Естественно, что производственные затраты на выпуск ИМС с такими структурами выше. Поэтому

структуры КНИ или КННЧ с полностью обеднёнными слоями конкурируют с более простыми в изготовлении.

## Транзисторные структуры

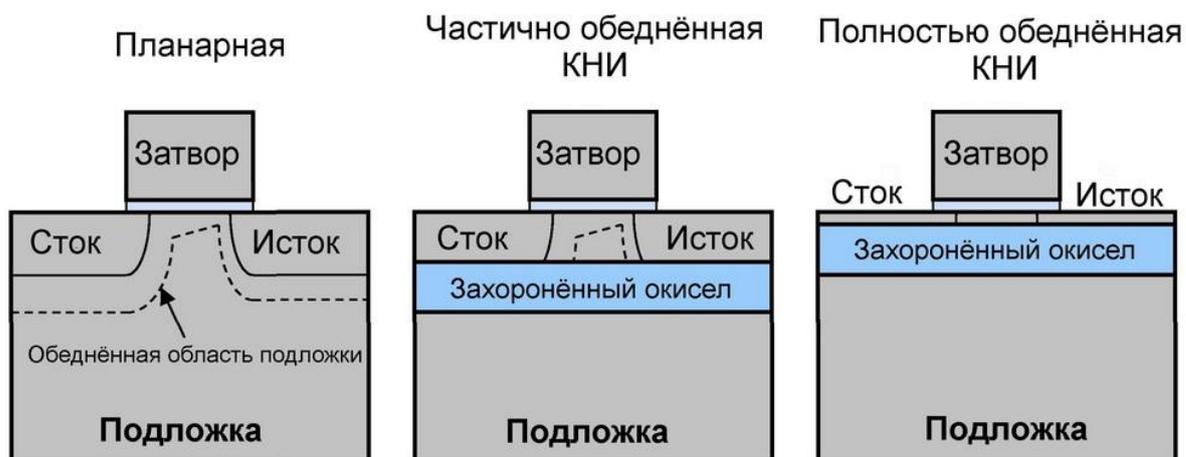


Рисунок 18. Сопоставление областей обеднения в обычной структуре и структурах КНИ с толщиной слоя полупроводника большей и меньшей толщины слоя обеднения.

Динамика введения новых решений в предшествующие и ближайшие годы иллюстрируется данными, приведенными в таблице 1.

Дальнейшее усложнение структур вызвано необходимостью повышения тока насыщения открытых транзисторов и снижения зависимости пороговых напряжений от изменения напряжения на стоке. Для этих целей разрабатываются различные типы многозатворных транзисторов. Кажущимся простейшим среди них является двухзатворный транзистор со вторым захоронённым затвором. Рисунок 19 иллюстрирует, каким образом введение второго затвора снижает зависимость поля в подзатворной области от напряжения на стоке и ток насыщения.

Таблица 1. Динамика новых технологических решений до 2011 года.

Процесс	P856	P858	Px60	P1262	P1264	P1266	P1268	P1270
Ввод в производство	1997	1999	2001	2003	2005	2007	2009	2011
Техпроцесс	0,25 мкм	0,18 мкм	0,13 мкм	90 нм	65 нм	45 нм	32 нм	22 нм
Размер пластины (мм)	200	200	200/300	300	300	300	300	300
Соединения	Al	Al	Cu	Cu	Cu	Cu	Cu	?
Канал	Si	Si	Si	напр. Si	напр. Si	напр. Si	напр. Si	напр. Si
Диэлектрик затвора	SiO <sub>2</sub>	High-k	High-k	High-k				
Материал затвора	Поликр. кремний	Металл	Металл	Металл				

Внедрение планируется в это время

может измениться

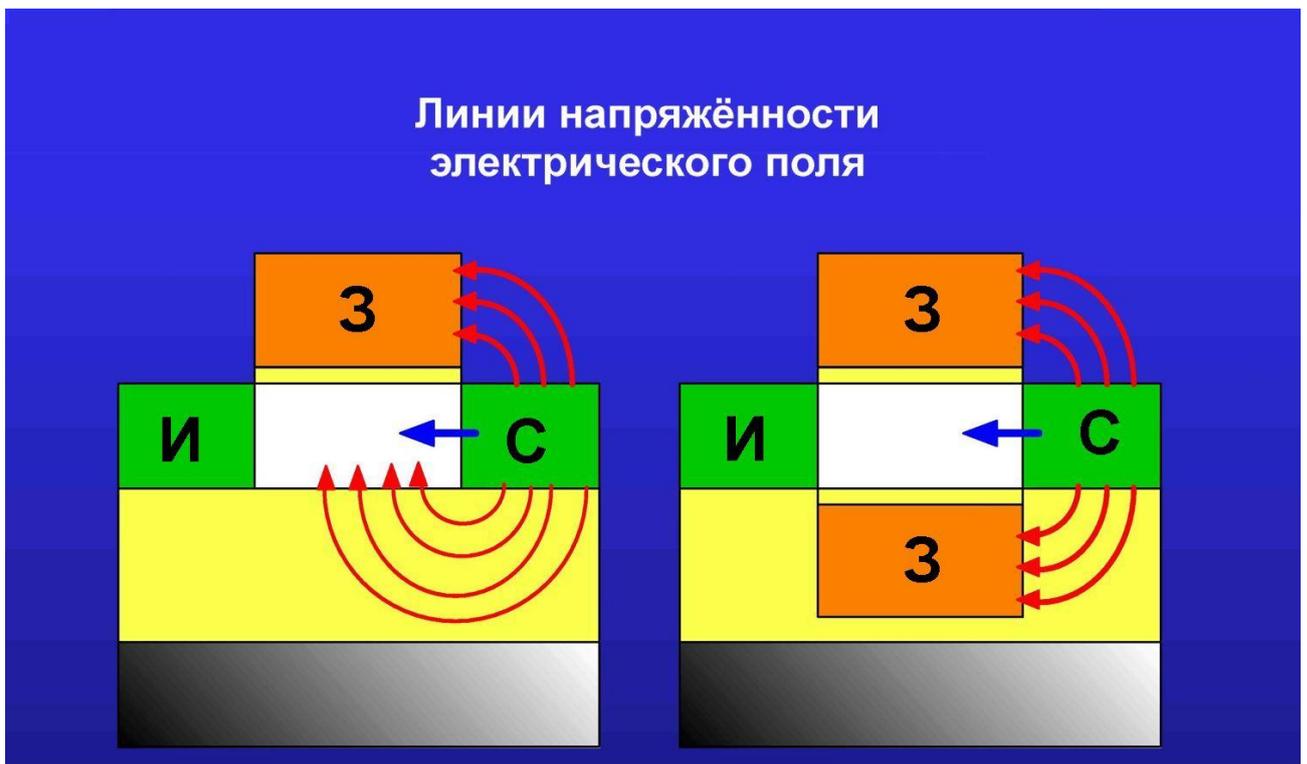


Рисунок 19. Влияние потенциала затвора в МДП-структурах с одинарным и двойным оппозитным затворами.

Образцы конструкций многозатворных транзисторов приведены на рисунках 20, 21.

## МДП КНИ с множественными затворами

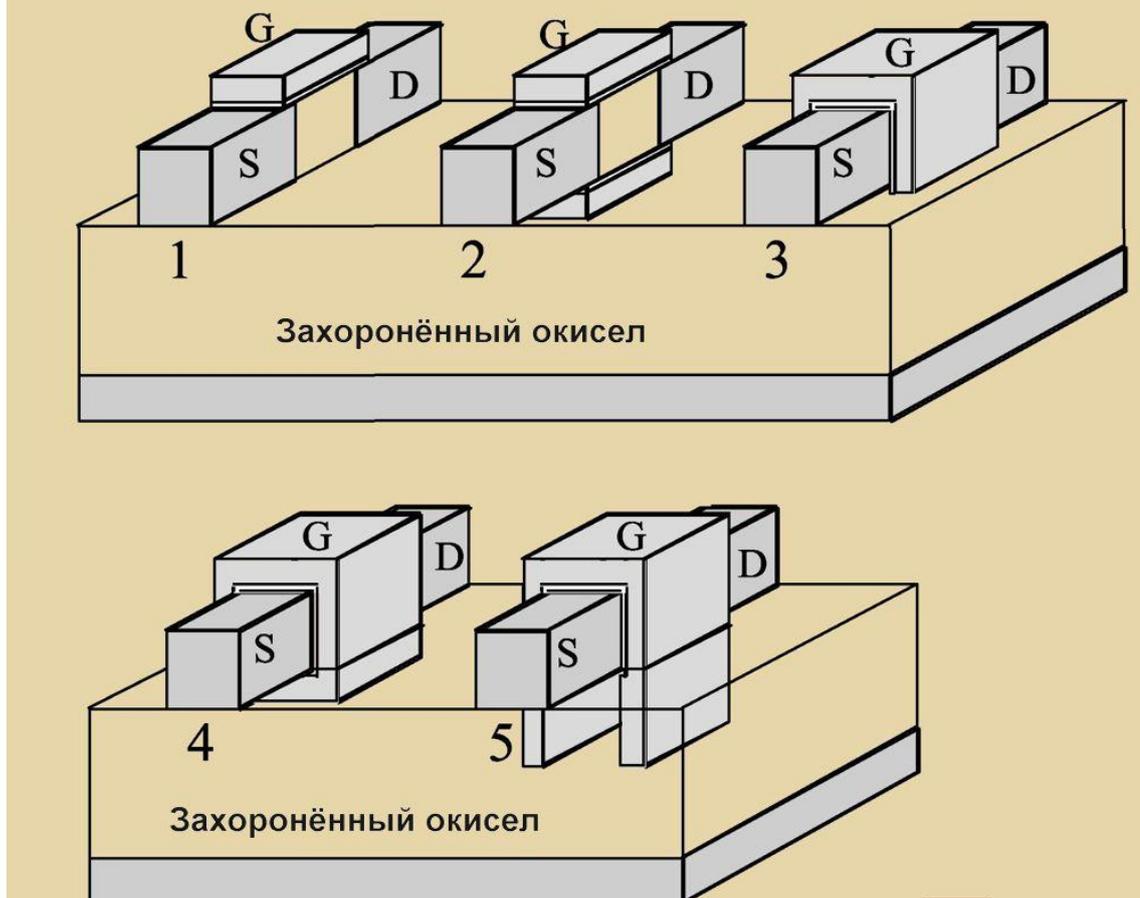


Рисунок 20. МДП КНИ-транзисторы с множественными затворами.

Иллюстрацией т.н. плавниковой конструкции служит рисунок 21, в ней вертикально расположенный слой полупроводникового материала с трёх сторон охватывается затворными диэлектриком и металлом.

На рисунке 22 представлена т.н. идеальная конструкция МДП-транзистора.

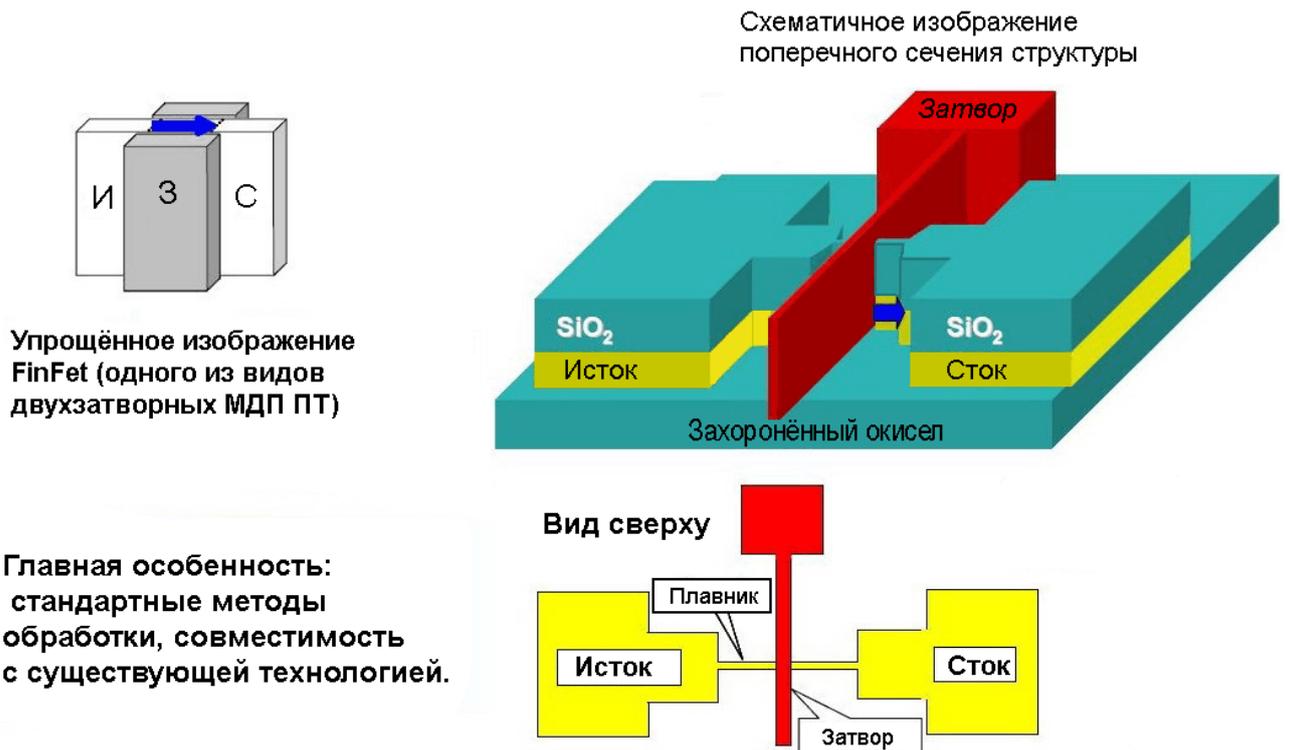


Рисунок 21. Полевой транзистор с плавниковой конструкцией – FinFET.

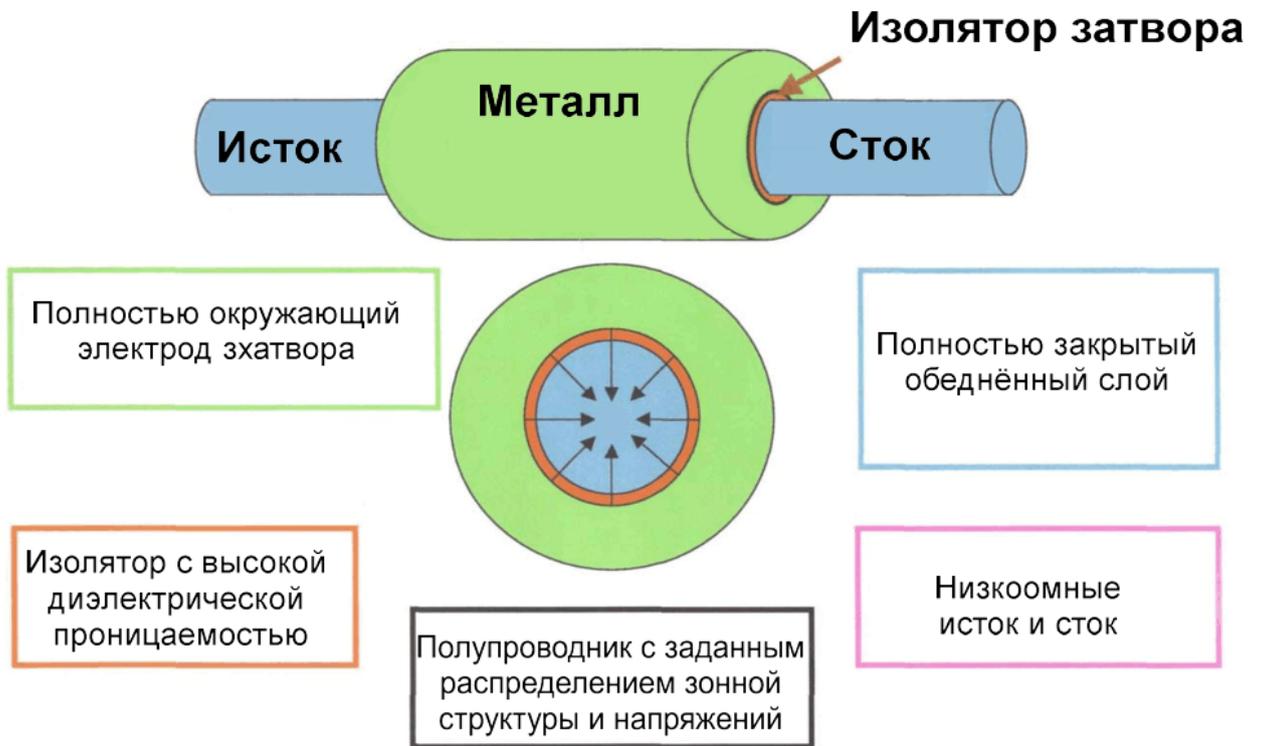


Рисунок 22. Идеальная конструкция МДП-транзистора.

### §3.2.3. Элементы памяти на основе МДП-транзисторов

МДП-транзисторы получили самое широкое применение в ИМС памяти. На основе МДП-транзисторов создаются схемы динамических запоминающих устройств с переменной выборкой (DRAM), в которых транзистор управляет зарядом конденсатора.

Наибольшее распространение приобрели схемы памяти, в которых элементом памяти является МДП-транзистор, модифицированный введением плавающего затвора (ПЗ). Рисунок 23 иллюстрирует принцип действия таких транзисторов.

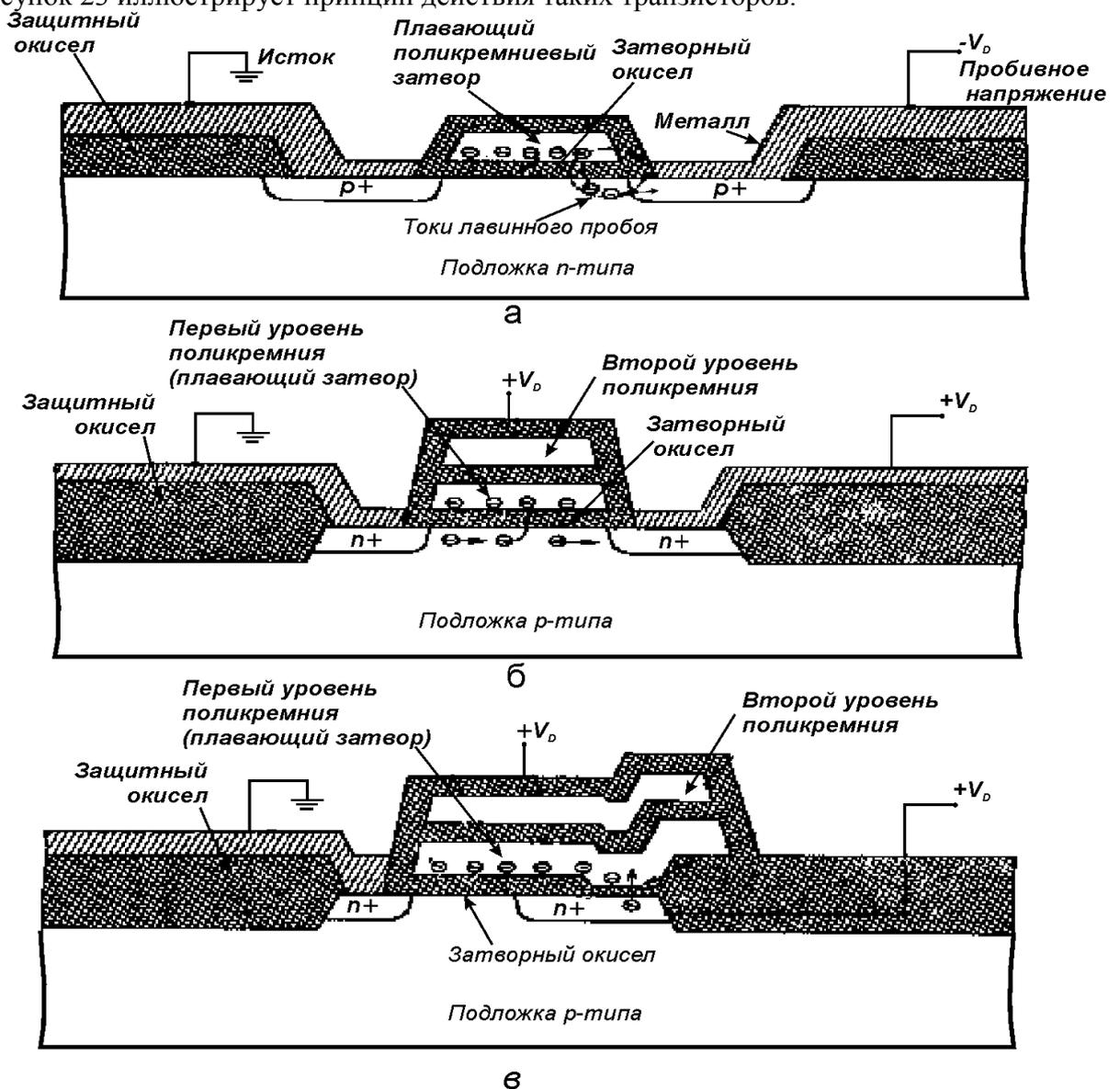


Рисунок 23. Память на МДП-транзисторе с плавающим затвором: а - иллюстрация механизма инжекции заряда на плавающий затвор при лавинном пробое перехода; б - элемент памяти на МДП-транзисторе с ПЗ и двумя уровнями поликремния; в - элемент памяти с ПЗ, в котором изменение содержимого может осуществляться с помощью туннелирования электронов сквозь тонкую плёнку окисла.

Введение дополнительных зарядов в диэлектрик управляющим импульсом фактически создаёт новый транзистор с отличным от предыдущего пороговым напряжением. Извлечение зарядов импульсом противоположной полярности возвращает транзистору ранее имевшееся пороговое напряжение. Заряды, введённые в подзатворный диэлектрик, не рекомбинируют в нём и не уходят из него годами, что обеспечивает долговременную энергонезависимую память. Такие схемы явились основой устройств флеш памяти, в которых сочетается высокая (до сотен гигабайт) ёмкость с высоким быстродействием. Развитию таких устройств будет посвящён следующий выпуск пособия.

## Заключение

Пройденный за менее чем  $\frac{3}{4}$  века путь от отдельных приборов до их интеграции столь впечатляющ, что может создаться обманчивое впечатление о его научно-технической завершенности. Важнейшей особенностью эволюции является постоянное расширение научной и технической базы, необходимое для разрешения противоречий развития. Это иллюстрируется таблицами 2, 3, приводимыми ITRS 2007.

Таблица 2. Определяющие проблемы процесса интеграции в ближайшие годы.

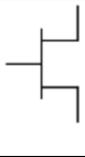
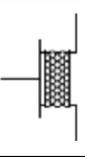
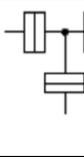
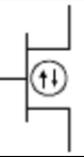
Определяющие проблемы при 22нм технологии	Содержание проблем
1. Уменьшение размеров МДП-транзисторов к 22нм технологическому уровню.	<p>Уменьшение размеров встретится со значительными трудностями вследствие -</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ необходимости повышения уровня легирования канала;</li> <li>▪ туннелирования зона – зона через переходы;</li> <li>▪ индуцированной затвором утечки тока стока;</li> <li>▪ флуктуаций уровня легирования материала;</li> <li>▪ трудностей адекватного управления эффектами короткого канала;</li> <li>▪ трудностей сдерживания роста паразитных элементов (последовательных сопротивлений истока и стока, окружающих ёмкостей).</li> <li>▪ Ожидаемая к этому времени промышленная реализация новых структур, таких как структуры КНИ с ультратонким телом (рабочим слоем) в транзисторах с множественными затворами встретится с рядом новых проблем. Особенно трудной проблемой является управление толщиной и воспроизводимостью свойств очень тонких слоёв</li> </ul>
2. Проблемы создания напряжённых слоёв для увеличения подвижности.	<p>С уменьшением размеров критически важно поддерживать и даже увеличивать значения подвижности в каналах КМДП, достигнутые введением механических напряжений. Однако, напряжения, вводимые современными методами, имеют тенденцию к снижению при уменьшении размеров.</p>
3. Оперативное обеспечение надёжности ИМС при многочисленных быстро появляющихся новых процессах, материалах и структурных изменениях.	<p>Ряд следующих важнейших изменений запланированы в последние семь лет.</p> <p>Материалы – подзатворный диэлектрик с высокой диэлектрической проницаемостью, металлические электроды к затвору, безсвинцовый припой.</p> <p>Процессы – селективная эпитаксия для приподнятых истока и стока,</p> <p>Развитые методики отжига, легирования и травления,</p>

	<p>Структуры – полностью обеднённые ультратонкие слои в структурах КНИ, многозатворные МДП-транзисторы, многокристальные модули.</p> <p>Важной задачей станет проверка обеспечения надёжности при использовании новых материалов, процессов и структур за приемлемое время.</p>
<p>4. Скейлинг динамических и статических ЗУПВ к 22нм технологическому уровню.</p>	<p>Основные проблемы динамических ЗУПВ - адекватные устройства ёмкости памяти при уменьшении размеров, в том числе трудности с введением диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью, с поддержанием утечек тока на приемлемом уровне, с расположением линий данных и слов из слоёв с низким сопротивлением для обеспечения желаемой скорости ДЗУПВ с уменьшенными размерами.</p> <p>Основные проблемы со статическими ЗУПВ – трудности поддержания адекватного уровня шума, управления нестабильностью ключа и скорости возникновения ошибок при уменьшении размеров. Так же как и возрастание трудностей литографии и травления при скейлинге.</p>
<p>5. Скейлинг энергонезависимой памяти высокой плотности к 22 нм технологическому уровню.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Флеш память – немасштабируемость туннельного диэлектрика и межслойного диэлектрика. Ключевыми проблемами являются свойства диэлектрического материала и управление его размерами.</li> <li>▪ Сегнетоэлектрические запоминающие устройства – проблема проектирования 1Т1С (один транзистор и одна ёмкость в каждой ячейке памяти) СЗУПВ (Сегнетоэлектрического ЗУ с произвольной выборкой) в установлении опорного напряжения, затруднённого тем, что сегнетоэлектрическая ёмкость нелинейна и является гистерезисным элементом цепи.</li> <li>▪ Магнитные запоминающие устройства свойства магнитных материалов и управление размерами. Чувствительность к температурным условиям изготовления и условиям работы ИМС.</li> </ul>

В таблице приведены сведения, относящиеся не только к кремниевым полупроводниковым, но и к альтернативным устройствам, основанным на других объектах и физико-химических явлениях. Сопоставление достигнутых и оценки

возможных значений параметров логических элементов и устройств памяти таких устройств приведено ниже в таблицах 3, 4, составленных на основе ITRS 2007.

Таблица 3. Достигнутые и планируемые параметры логических устройств.

Устройство								
	ПТ	Усовершенствованный ПТ		ОЭТ <sup>1</sup>	Молекулярный элемент	Ферромагнитная логика	Спиновый транзистор	
		1D структуры	Замещение канала					
Типичный представитель класса устройств	Si КМДП	<ul style="list-style-type: none"> <li>УНТ<sup>2</sup> ПТ</li> <li>НП<sup>3</sup> ПТ</li> <li>НП гетероструктуры</li> <li>Наноленточные транзисторы на графене</li> </ul>	Полупроводниковые соединения III-V гр. и Ge канал	ОЭТ	<ul style="list-style-type: none"> <li>Crossbar latch<sup>4</sup></li> <li>Молекулярный транзистор</li> <li>Молекулярный QCA<sup>5</sup></li> </ul>	Подвижная доменная стенка Магнитный QCA	<ul style="list-style-type: none"> <li>СУТ<sup>6</sup></li> <li>СПТ<sup>7</sup></li> <li>СВМТ<sup>8</sup></li> </ul>	
Размер ячейки	Планируемый	100 нм	100 нм	300 нм	40 нм	10 нм	140 нм	100 нм
	Достигнутый	590 нм	~1.5 мкм	1700 нм	~200 нм	~2 мкм	250 нм	100 мкм
Плотность (устр./см <sup>2</sup> )	Планируемая	1E10	4.5E9	6.1E9	6E10	1E12	5E9	4.5E9
	Достигнутая	2.8E8	4E7	3.5E7	~2E9	2E7	1.6E9	1E4
Скорость переключения	Планируемая	12 ТГц	6.3 ТГц	>1 ТГц	10 ТГц	1 ТГц	1 ГГц	40 ГГц
	Достигнутая	1,5 ТГц	200 МГц	>300 ГГц	2 ТГц	100 Гц	30 Гц	Не известно
Скорость коммутации	Планируемая	61 ГГц	61 ГГц	61 ГГц	1 ГГц	1 ГГц	10 МГц	Не известно
	Достигнутая	5.6 ГГц	220 ГГц	Нет данных				Не известно
Энергия перекл., Дж	Планируемая	3E-18	3E-18	3E-18	1·10 <sup>-18</sup>	5E-17	~1E-17	3E-18
	Достигнутая	1E-16	1E-8	1e-16	8·10 <sup>-17</sup>	3E-7	6E-18	Не известно
Пропускная способность Гбит/нс/см <sup>2</sup>	Планируемая	238	238	61	10	1000	5E-2	Не известно
	Достигнутая	1.6	1E-8	Нет данных	2E-4	5E-9	5E-8	Не известно
Рабочая температура		Комн.	Комн.	Комн.	Комн.	Комн.	Комн.	Комн.
Система материалов		Si	УНТ, Si, Ge, III-V, In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZnO, TiO <sub>2</sub> , SiC	InGa, InAs, InSb	III-V, Si, Ge	Органические молекулы	Ферромагнитные сплавы	Si, III-V, группа оксидов металлов
Активность исследований			379	62	91	244	32	122

1. ОЭТ - транзистор, на основе одноэлектронного туннелирования (SET – single-electron tunneling transistor).
2. УНТ – углеродная нанотрубка (CNT – carbon nanotube).
3. НП – нанопровод (NW – nanowires).
4. Crossbar latch – технология перекрестного защелкивания (замок на перекрестии).
5. QCA (Quantum-dot cellular automata) – клеточные автоматы на основе квантовых точек.
6. СУТ – транзистор со спиновым усилением (Spin Gain transistor).
7. СПТ – спиновый полевой транзистор (Spin FET).
8. СВМТ – транзистор на основе спинового вращательного момента (Spin Torque transistor).

Таблица 4. Достиженные и планируемые параметры резистивных устройств памяти.

		Наномеханическая память	Память с плавким элементом <sup>1</sup>	Ионная память	Память на электронном эффекте	Память на макромолекулах	Память на молекулах
Механизм хранения		механическое переключение с электростатическим управлением	Несколько механизмов	Ионный транспорт и окислительно-восстановительная реакция	Несколько механизмов	Несколько механизмов	Не известен
Элемент ячейки		1Т1Р <sup>2</sup> или 1Д1Р <sup>3</sup>	1Т1Р или 1Д1Р	1Т1Р или 1Д1Р	1Т1Р или 1Д1Р	1Т1Р или 1Д1Р	1Т1Р или 1Д1Р
Типы устройств		1) наномост/кантилевая 2) телескопические УНТ 3) Наночастица	МДМ <sup>4</sup> (напр. Pt/NiO/Pt)	1) Миграция катионов 2) Миграция анионов	1) Захват заряда 2) Переход Мота 3) Ферроэлектрический барьерный эффект	МДМ - (НЦ <sup>5</sup> ) - ДМ	Бистабильный переключатель
F – характерный размер триггерной ячейки	Мин. требуемый	<65 нм	<65 нм	<65 нм	<65 нм	<65 нм	<65 нм
	Наилучший планируемый	5-10 нм	5-10 нм	5-10 нм	5-10 нм	5-10 нм	5 нм
	Достигнутый	180 нм	180 нм	90 нм	1 мкм	250 нм	30 нм
Площадь ячейки	Мин. Требуемая	10 F <sup>2</sup>	10 F <sup>2</sup>	10 F <sup>2</sup>	10 F <sup>2</sup>	10 F <sup>2</sup>	10 F <sup>2</sup>
	Наилучшая планируемая	5 F <sup>2</sup>	8/5 F <sup>2</sup>	8/5 F <sup>2</sup>	8/5 F <sup>2</sup>	8/5 F <sup>2</sup>	5 F <sup>2</sup>
	Достигнутая	Нет данных	Нет данных	8 F <sup>2</sup>	Нет данных	Нет данных	Нет данных
Время Чтения	Мин. требуемое	<15 нс	<15 нс	<15 нс	<15 нс	<15 нс	<15 нс
	Наилучшее планируемое	<3 нс	<10 нс	<10 нс	<10 нс	<10 нс	<10 нс
	Достигнутое	3 нс	Нет данных	<50 нс	Нет данных	~10 нс	Нет данных
Время Записи/Стирания	Мин. требуемое	Зависит от сферы применения	Зависит от сферы применения	Зависит от сферы применения	Зависит от сферы применения	Зависит от сферы применения	Зависит от сферы применения
	Наилучшее планируемое	<1 нс	<10 нс	<20 нс	<20 нс	<10 нс	<40 нс
	Достигнутое	3 нс	10 нс/5 мкс	<50 нс	100 нс	10 нс	0.2 с
Время Хранения	Мин. требуемое	>10 лет	>10 лет	>10 лет	>10 лет	>10 лет	>10 лет
	Наилучшее планируемое	>10 лет	>10 лет	>10 лет	>10 лет	Не известно	Не известно
	Достигнутое	~день	>8 месяцев	>10 лет	1 год	6 месяцев	2 месяца
Количество циклов Записи	Мин. требуемое	>1E5	>1E5	>1E5	>1E5	>1E5	>1E5
	Наилучшее планируемое	3E16	3E16	3E16	3E16	3E16	3E16
	Достигнутое	>1E9	>1E6	>1E6	>1Y3	>1E6	>2E3
Продолжение таблицы 4							
Рабочее напряжение	Мин. требуемое	Зависит от сферы применения	Зависит от сферы применения	Зависит от сферы применения	Зависит от сферы применения	Зависит от сферы применения	Зависит от сферы применения

Записи (В)	Наилучшее планируемое	Не известно	0.5/1	<0.5	<3	<1	80 мВ
	Достигнутое	1.5	0.5/1	+0.6/-0.2	3-5	~±2	~±1.5
Рабочее напряжение Чтения (В)	Мин. требуемое	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	Наилучшее планируемое	0.7	<0.5	0.2	0.7	0.7	0.3
	Достигнутое	1.5	0.4	0.15	0.7	1	0.5
Энергия записи (Дж/бит)	Мин. Требуемая	Зависит от сферы применения	Зависит от сферы применения	Зависит от сферы применения	Зависит от сферы применения	Зависит от сферы применения	Зависит от сферы применения
	Наилучшая планируемая	Не известно	Не известно	1Е-15	<1Е-10	Не известно	2Е-19
	Достигнутая	Нет данных	1Е-12	5Е-14	1Е-9	1Е-13	Нет данных
Комментарии		Существует проблема масштабирования обратного напряжения	Потенциально применима для многобитового хранения данных	1)Потенциально применима для многобитового хранения данных 2)Создан прототип микросхемы емкостью 2 Мбит 3)Существует проблема низкого напряжения чтения	1)Потенциально применима для многобитового хранения данных 2)Существует проблема низкого напряжения чтения		Создан прототип микросхемы емкостью 160 Кбит
Активность исследований		22	30	47	44	77	90

1. Fuse/Antifuse Memory – память на основе механизма плавка/антиплавка.
2. 1Т1Р – 1 транзистор 1 резистор.
3. 1Т1Д – 1 транзистор 1 диод.
4. МДМ – металл - диэлектрик - металл (МИМ - Metal - Insulator - Metal ).
5. НЦ – нитроцеллюлоза (NC).