



Учреждение Российской академии наук  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ СИСТЕМНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ РАН

# Аспекты радиационной стойкости интегральных микросхем

Осипенко Павел Николаевич  
[osipenko@niisi.msk.ru](mailto:osipenko@niisi.msk.ru)

# Структура доклада

- Описание проблемы, постановка задачи
- Механизмы деградации ИС при воздействии ИИ и методы повышения стойкости
  - к воздействию накопленной дозы
  - к одиночным отказам
  - к одиночным обратимым эффектам
- Примеры реализации технических решений по повышению стойкости рад.стойкости СБИС
- Перспективные работы
- Заключение

# Проблема

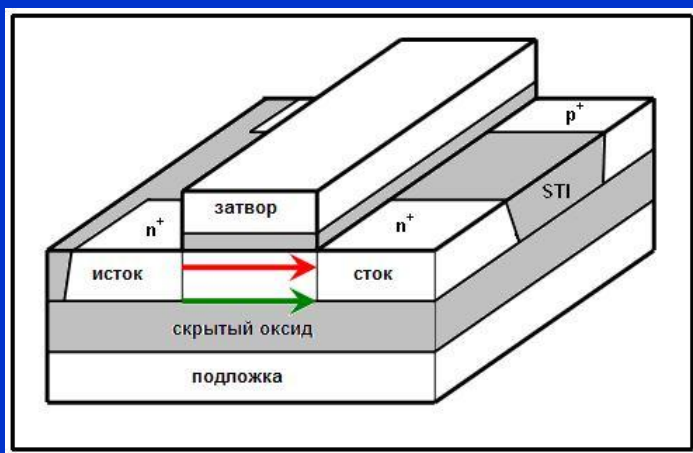
- Ионизирующее излучение (ИИ) приводит к различным нежелательным эффектам в интегральных схемах (ИС), наиболее существенными из которых считаются:
  - Параметрические отказы, вследствие деградации характеристик ИС по мере накопления дозы ИИ (**Total Ionizing Dose, TID**);
  - Одиночные обратимые эффекты, основными из которых считаются сбои, т.е. изменение логического состояния элемента ИС (**Single Event Upset, SEU**);
  - Одиночные отказы, основной причиной которых считается эффект тиристорной защелки (**Single Event Latch-up, SEL**).

## Постановка задачи

- Разработка методов и средств разработки интегральных схем, обеспечивающих достижение требуемых параметров стойкости по комплексу воздействующих факторов ИИ является актуальной задачей

# Механизмы деградации интегральных схем при воздействии накопленной дозы

- образование радиационно-индуцированных токов утечки;
- сдвиг порогового напряжения;
- деградация подвижности носителей заряда;



Радиационно-индуцированные утечки по паразитным структурам вблизи STI в КМОП КНИ технологии

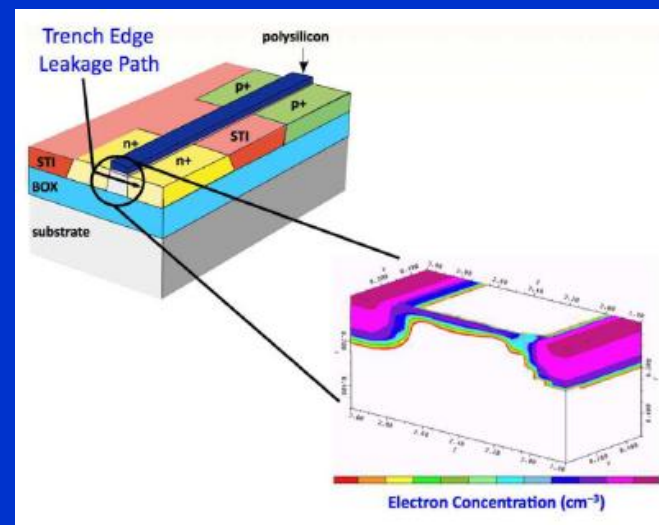
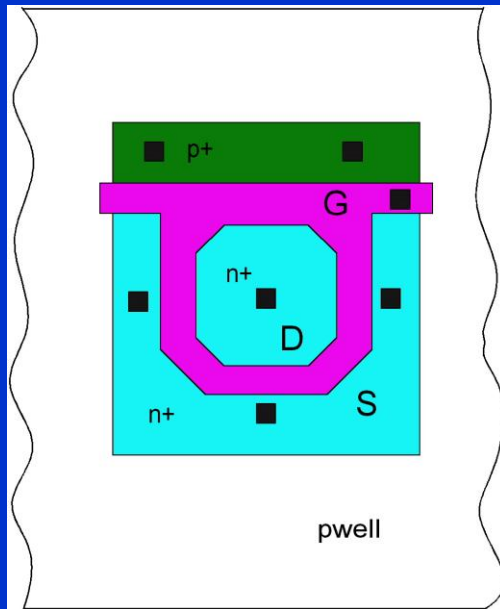


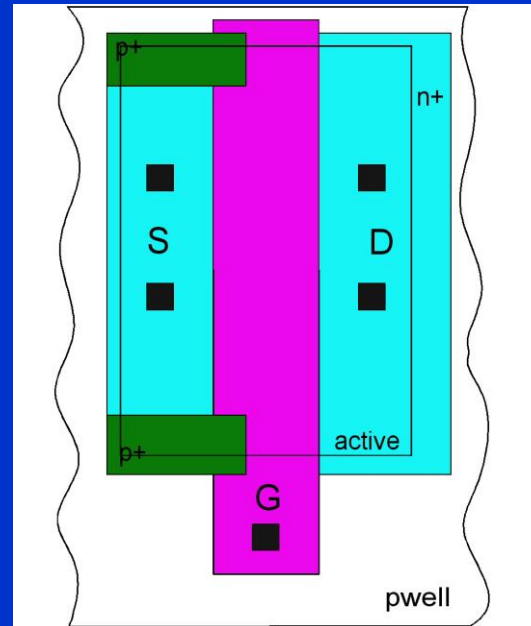
Иллюстрация пути протекания радиационно-индуцированной утечки вблизи боковой изоляции

# Методы борьбы с эффектами TID

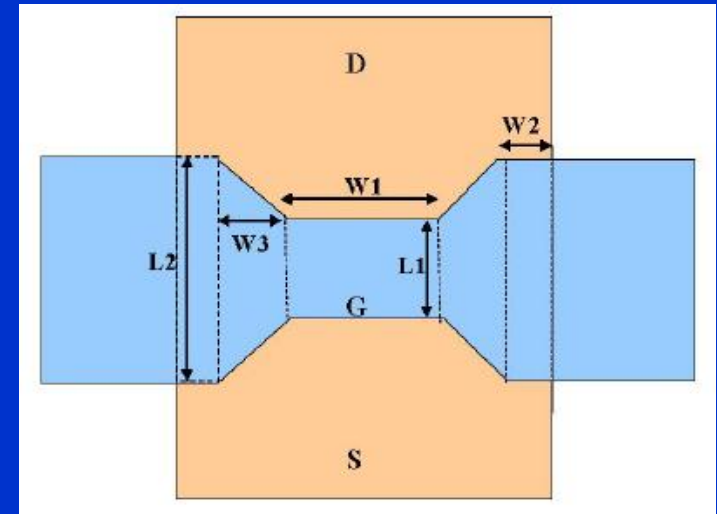
## Подавление боковой утечки топологическими методами



Топология кольцевого транзистора



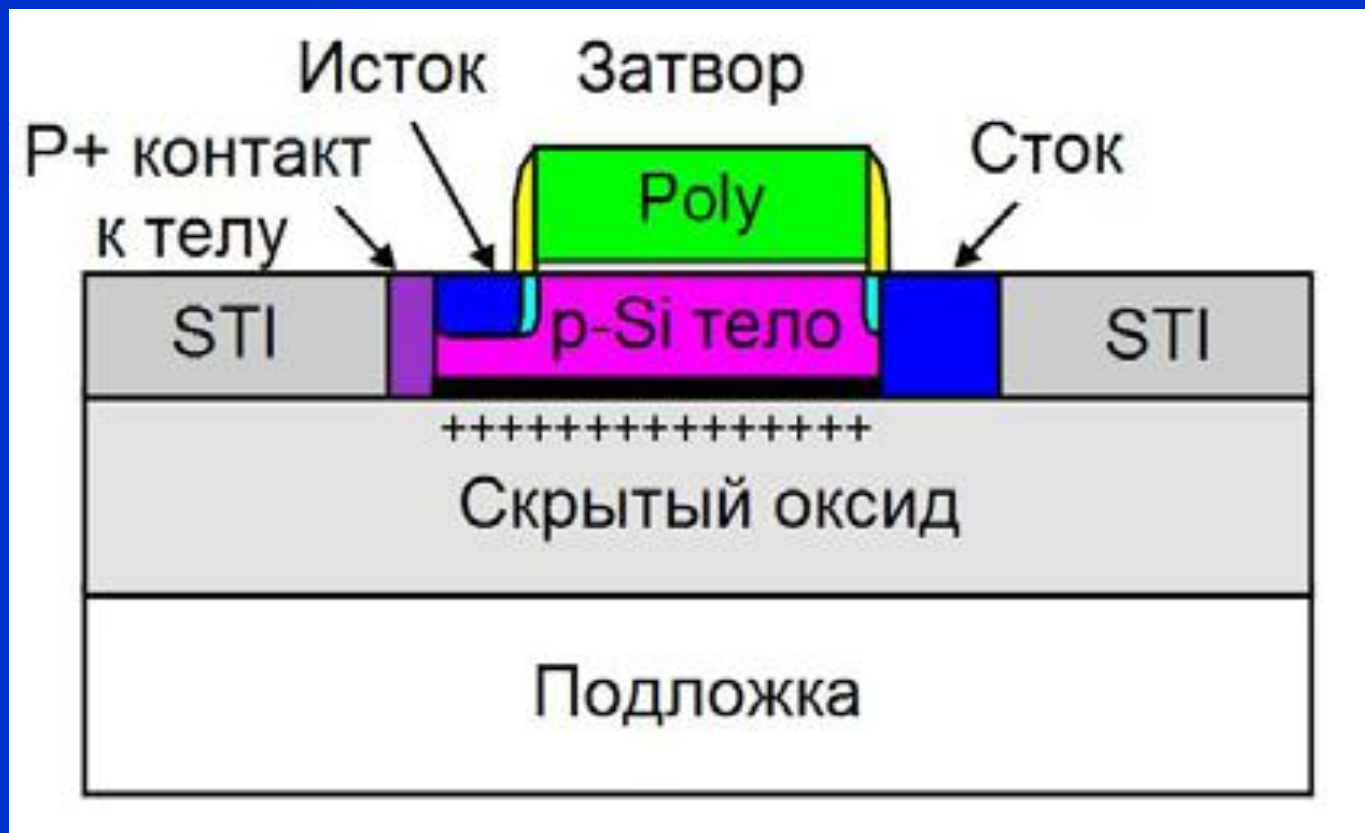
Топология транзистора А-типа



Топология «собачья кость» (“dog-bone”)

# Методы борьбы с эффектами TID

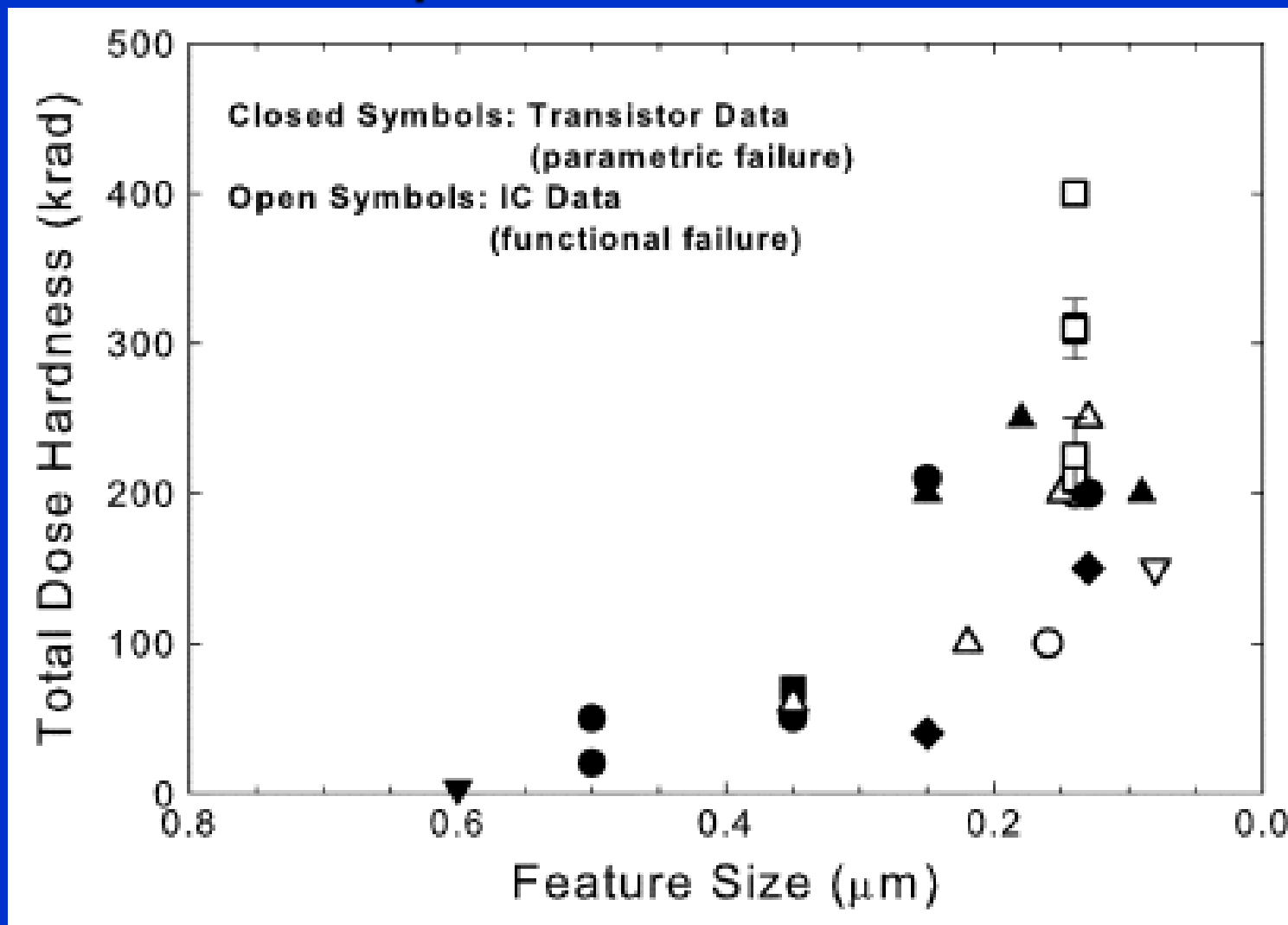
## Подавление донной утечки технологическими методами



Разрез структуры BUSFET

Felix J. A., Schwank J. R., Cirba C. R., Schrimpf R. D., Shaneyfelt M. R., Fleetwood D. M., Dodd P. E., "Influence of total-dose radiation on the electrical characteristics of SOI MOSFETs," *Microelectronic Engineering* 72, pp. 332-341, 2004.

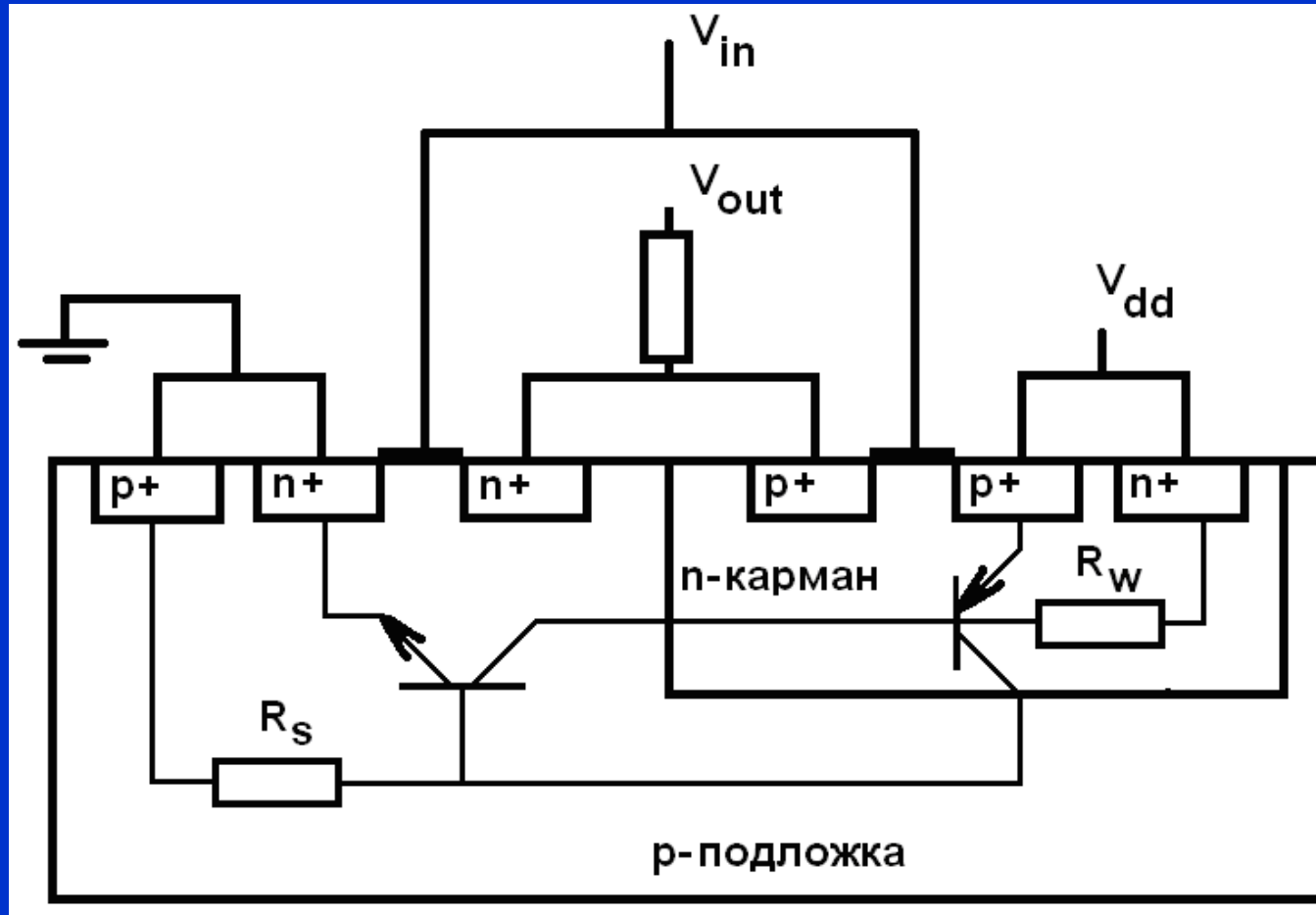
# Тенденция изменения стойкость к эффектам TID с развитием технологии



P.E. Dodd, M.R. Shaneyfelt, J.R. Schwank, J.A. Felix, "Current and Future Challenges in Radiation Effects on CMOS Electronics," IEEE Trans. on Nucl. Sci, vol. 57, no. 4, pp. 1747-1763, August 2010

# Механизмы деградации интегральных схем при ОЯЧ

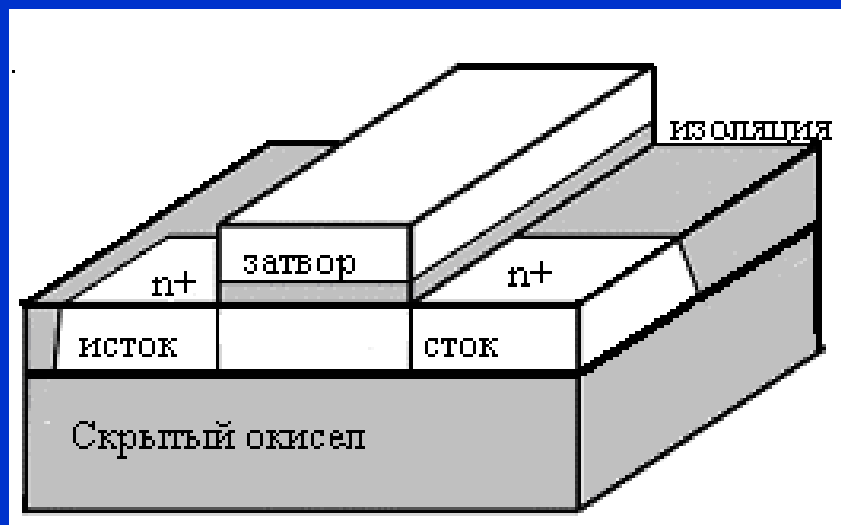
## Эффекты тиристорной защелки (SEL)



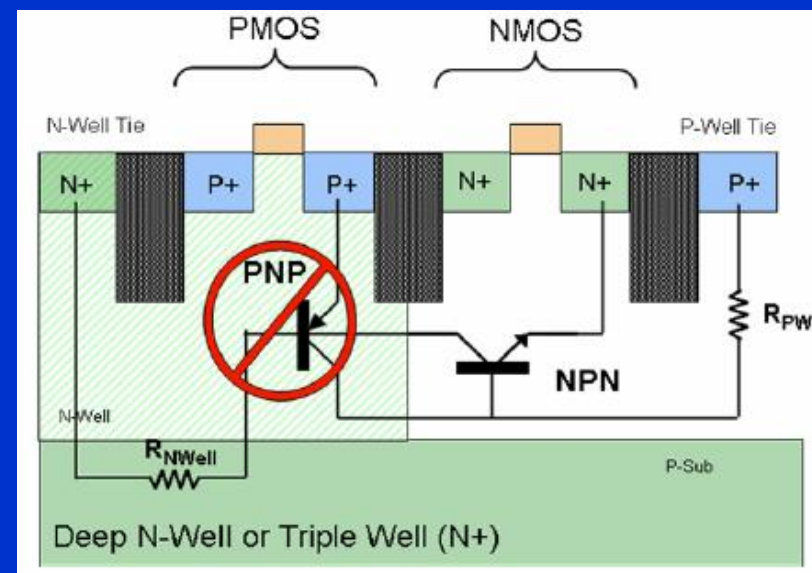
Схема, иллюстрирующая наличие паразитных биполярных транзисторов в n-p-n-p структуре КМОП инвертора с n-карманом



# Методы борьбы с эффектами SEL Технологические

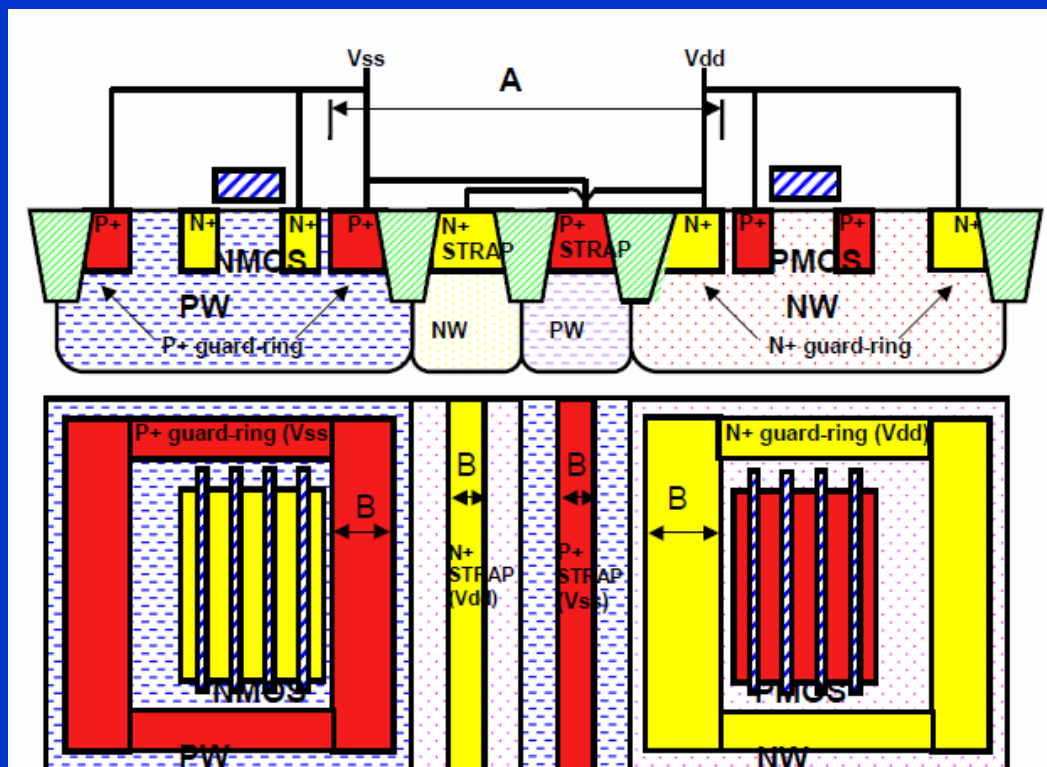


Сечение транзистора, выполненного по технологии КНИ



Метод борьбы с тиристорным эффектом с помощью глубокого N-кармана (DNW)

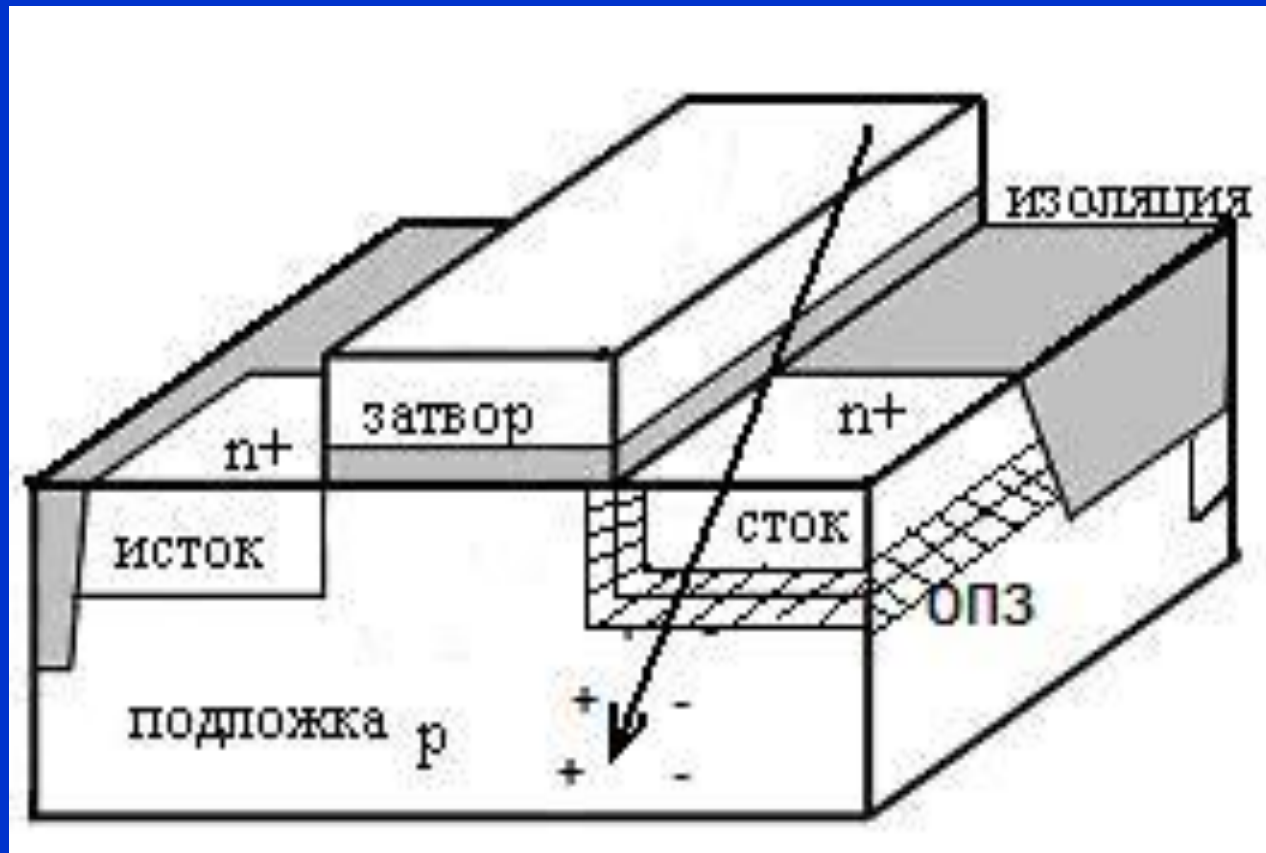
# Методы борьбы с эффектами SEL Топологические



Применение двойных охранных колец

# Механизмы деградации интегральных схем при ОЯЧ

## Эффекты одиночных сбоев (SEU), эффекты переходного процесса (SET), эффекты функционального прорывания (SEFI)



# Методы борьбы с одиночными сбоями

## Сбоеустойчивые библиотечные ячейки

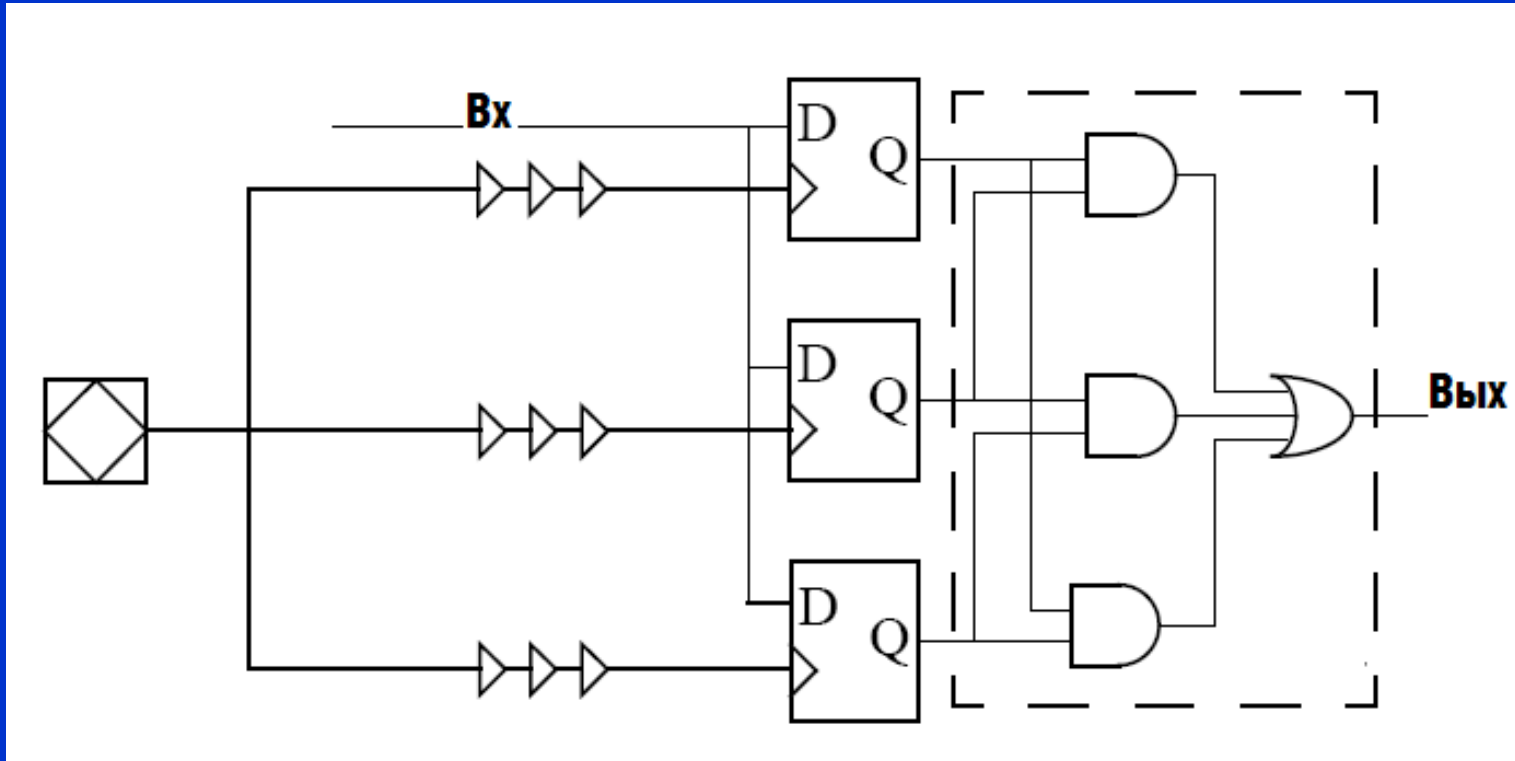
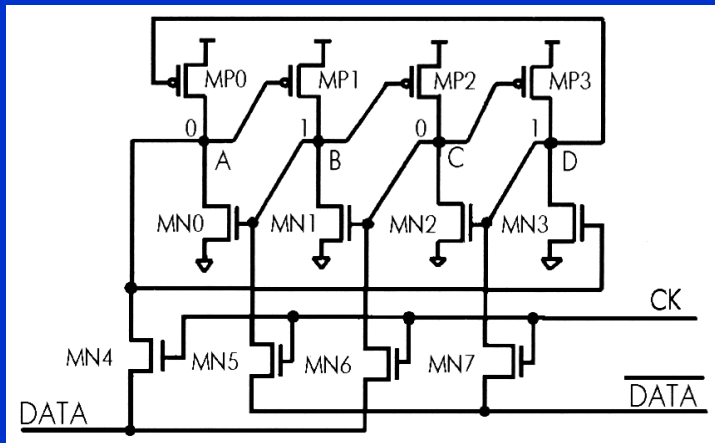
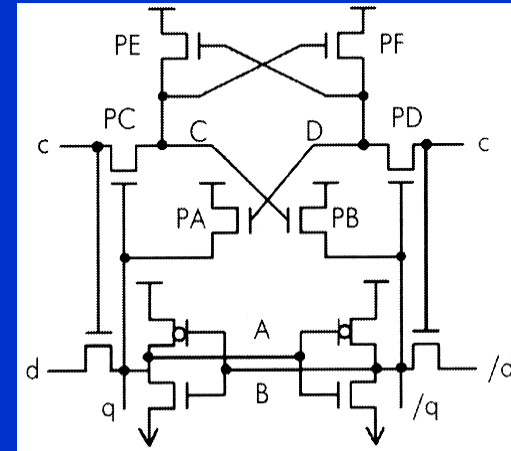


Схема TMR триггера

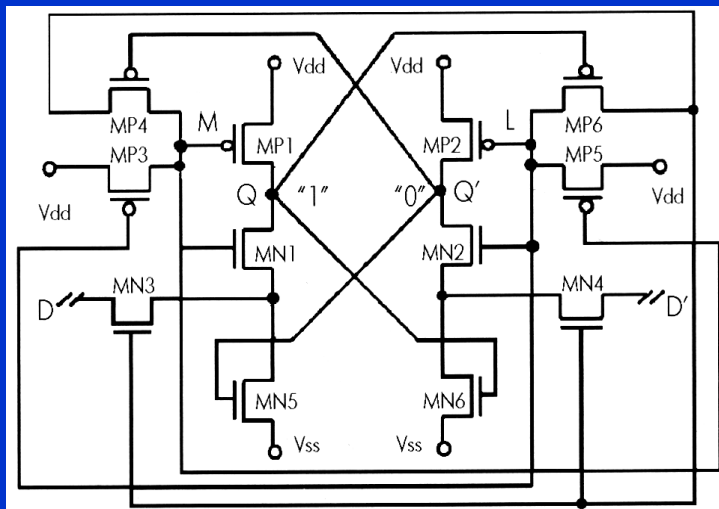
# Методы борьбы с одиночными сбоями. Сбоеустойчивые элементы памяти



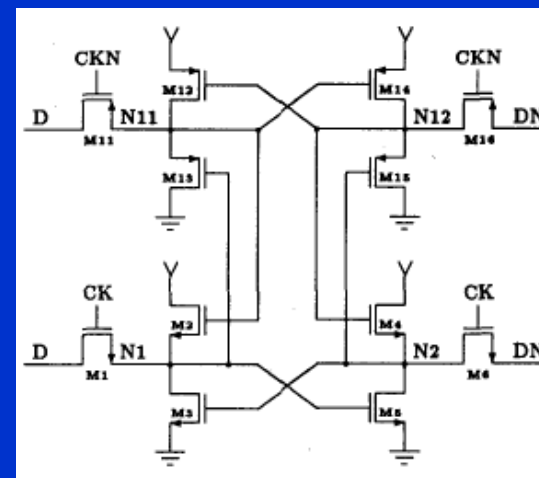
ячейка памяти  
DICE



Сбоеустойчивая ячейка памяти IBM



НIT-сбоеустойчивая ячейка памяти



Ячейка памяти NASA

# Методы борьбы с одиночными сбоями. Резервирование на уровне функциональных блоков с самовосстановлением



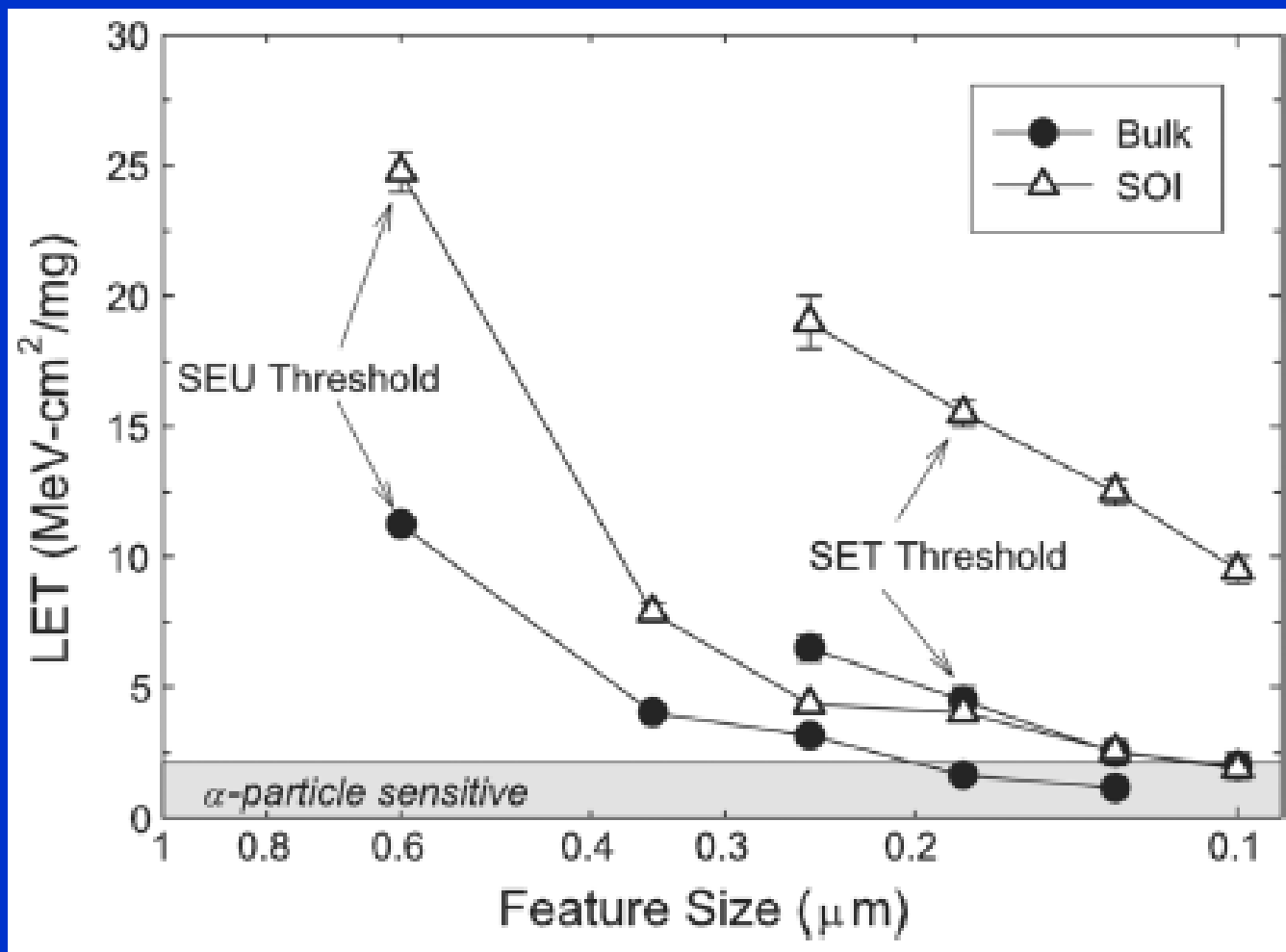
## Методы борьбы с одиночными сбоями. Применение корректирующих кодов

- Защита кэш-памяти битов четности + стратегия записи write-through позволяет эффективно обнаруживать и исправлять одиночные сбои
- Защита регистрового файла и интерфейса с внешним ОЗУ корректирующим кодом Хемминга позволяет исправлять одиночные сбои и обнаруживать двойные

### Особые методы защиты от сбоев

- Подана заявка на патент: «Способ и устройство исправления одиночных ошибок и предотвращения возникновения двойных ошибок в регистровом файле»

# Тенденция изменения чувствительности к одиночным эффектом с уменьшением технологических норм

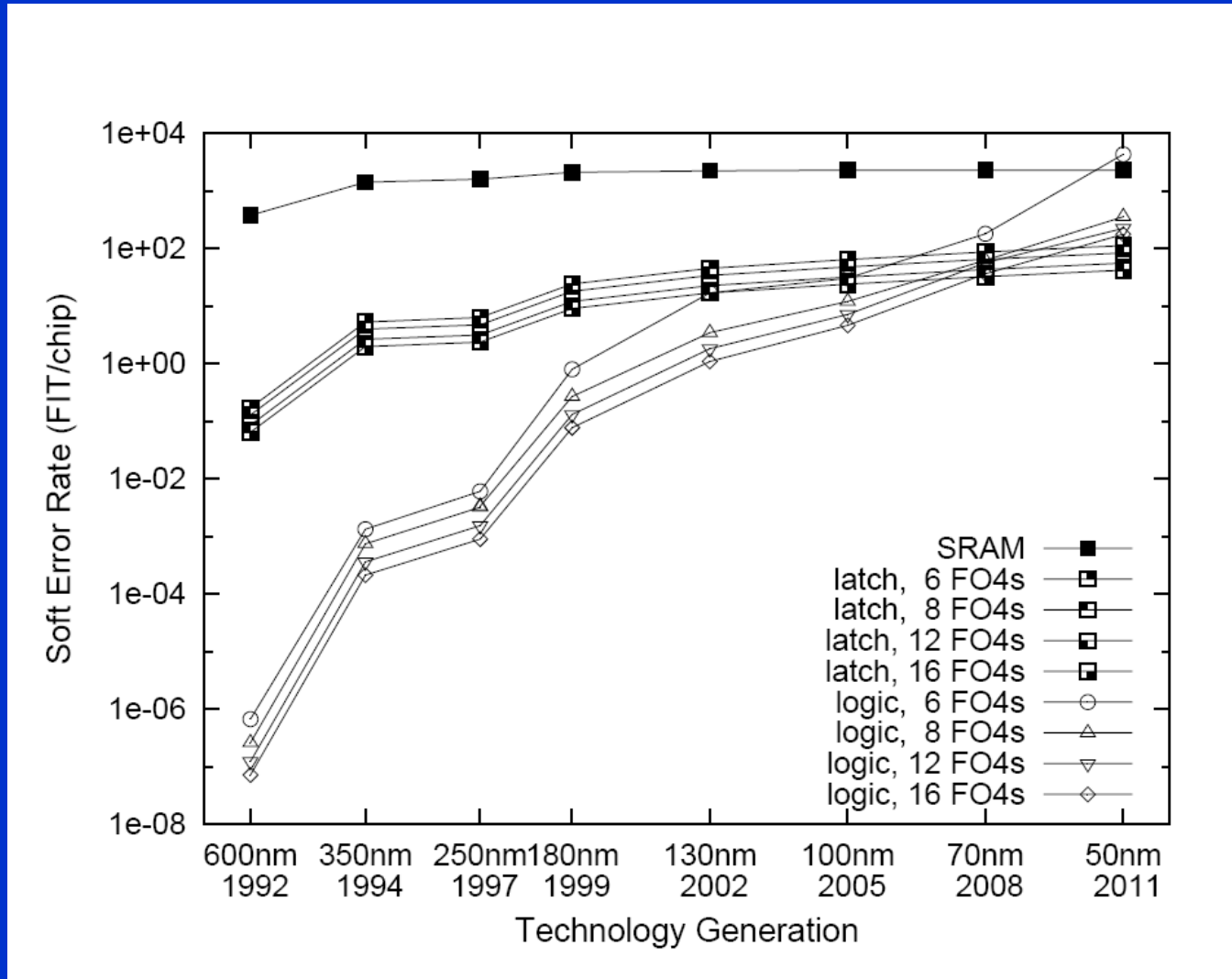


Результаты моделирования критического значения ЛПЭ для SET и SEU как функции топологической нормы для объёмной и КНИ КМОП технологии.

P. E. Dodd, M. R. Shaneyfelt, J. A. Felix, and J. R. Schwank, "Production and propagation of single-event transients in high-speed digital logic ICs," IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 51, no. 6, pp. 3278–3284, Dec. 2004



# Тенденция увеличения влияния SET с уменьшением технологических норм



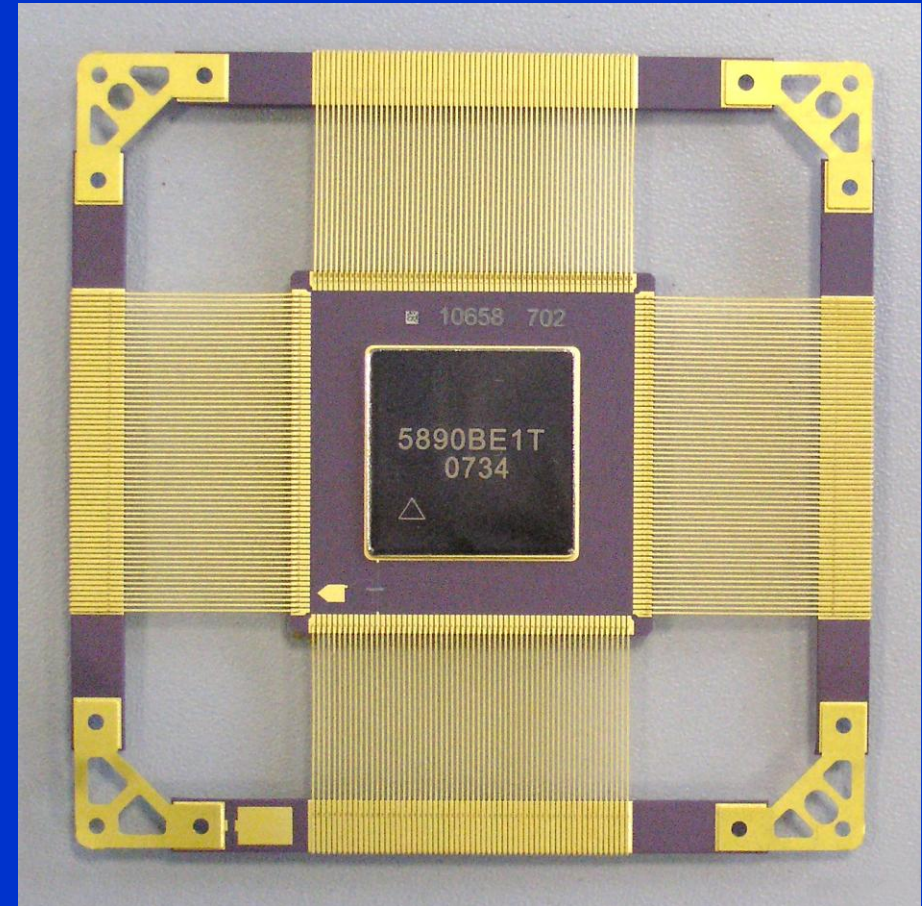
P. Shivakumar, S.Keckler at al., "Modelling the Effects of technology Trends on the Soft Error Rate of Combinational Logic,"  
Int.Conference on Dependable Systems and Networks, 2002

# Примеры реализации технических решений по повышению рад.стойкости СБИС

# 5890BE1T

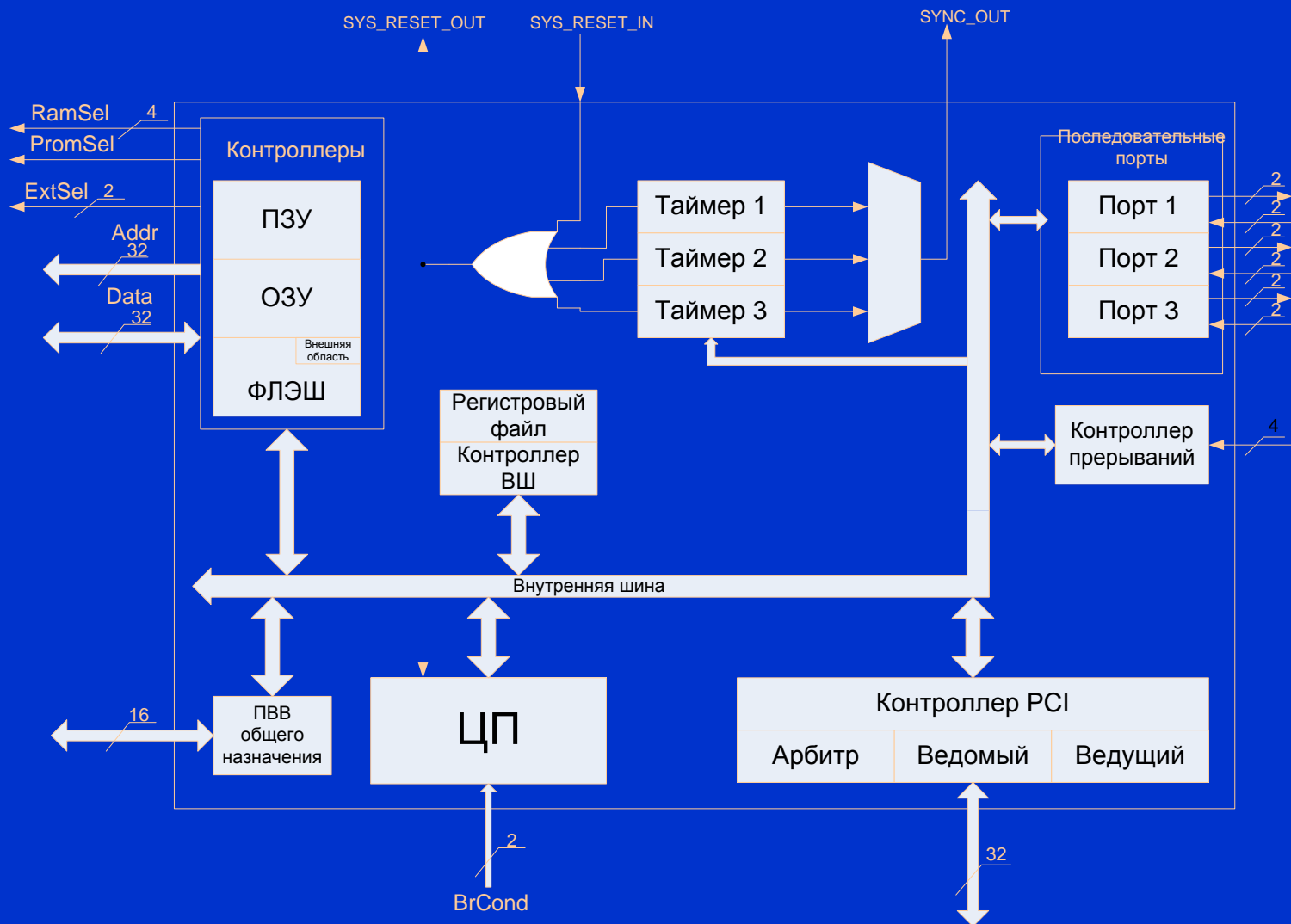
## Система на кристалле на базе 32-разрядного микропроцессора

- АРХИТЕКТУРА МП - КОМДИВ
- РАБОЧАЯ ЧАСТОТА 33 МГц
- ТЕХНОЛОГИЯ – КНИ 0,5 мкм
- НАПРЯЖЕНИЕ ПИТАНИЯ – 3,3 В
- ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ДИАПАЗОН –  
*от – 60 до + 125*
- РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ПО  
ФАКТУРУ 7И7 – 4\*4Ус



# 5890BE1T

## Система на кристалле на базе 32-разрядного микропроцессора

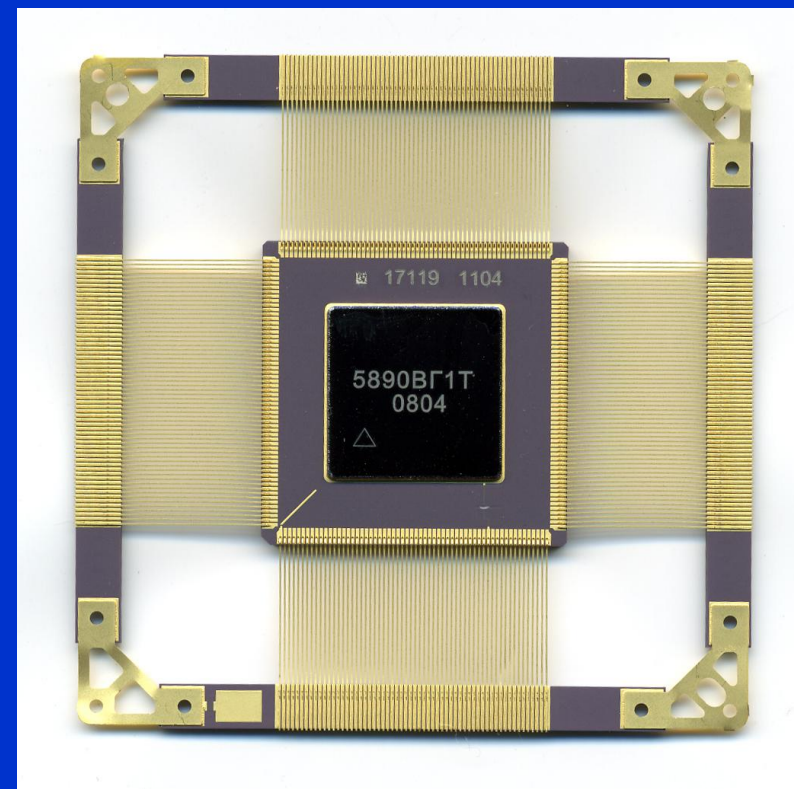


33 МГц, 0,5 КМОП КНИ

# 5890ВГ1Т

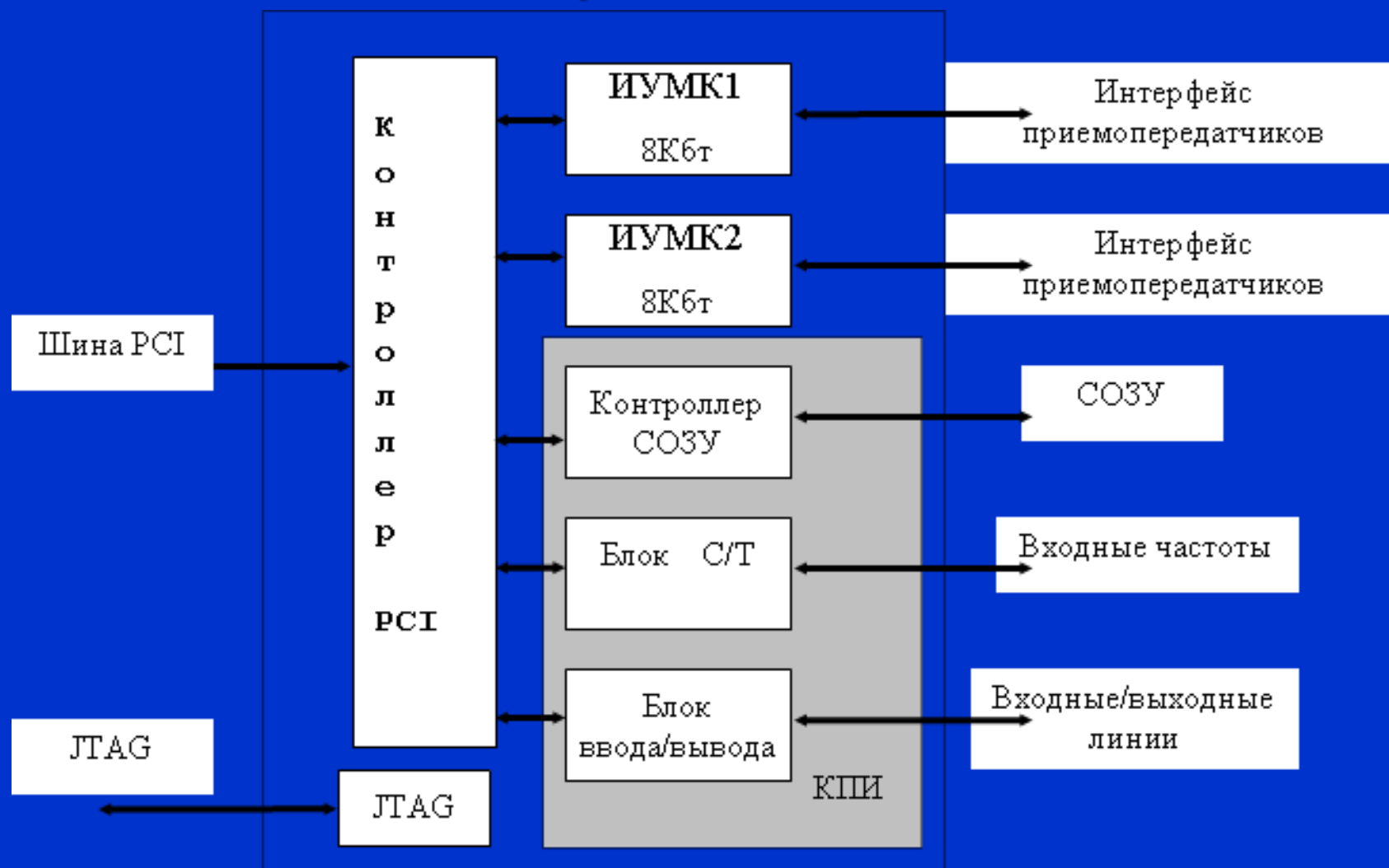
Двухканальный интерфейсный контроллер по ГОСТ Р 52070-2003 со  
встроенной памятью

- ТЕХНОЛОГИЯ – КНИ 0,5 мкм
- НАПРЯЖЕНИЕ ПИТАНИЯ – 3,3 В
- ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ДИАПАЗОН –  
*от – 60 до + 125*
- РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ПО  
ФАКТОРУ 7И7 – 4\*4Ус



# 5890ВГ1Т

## Двухканальный интерфейсный контроллер по ГОСТ Р 52070-2003 со встроенной памятью



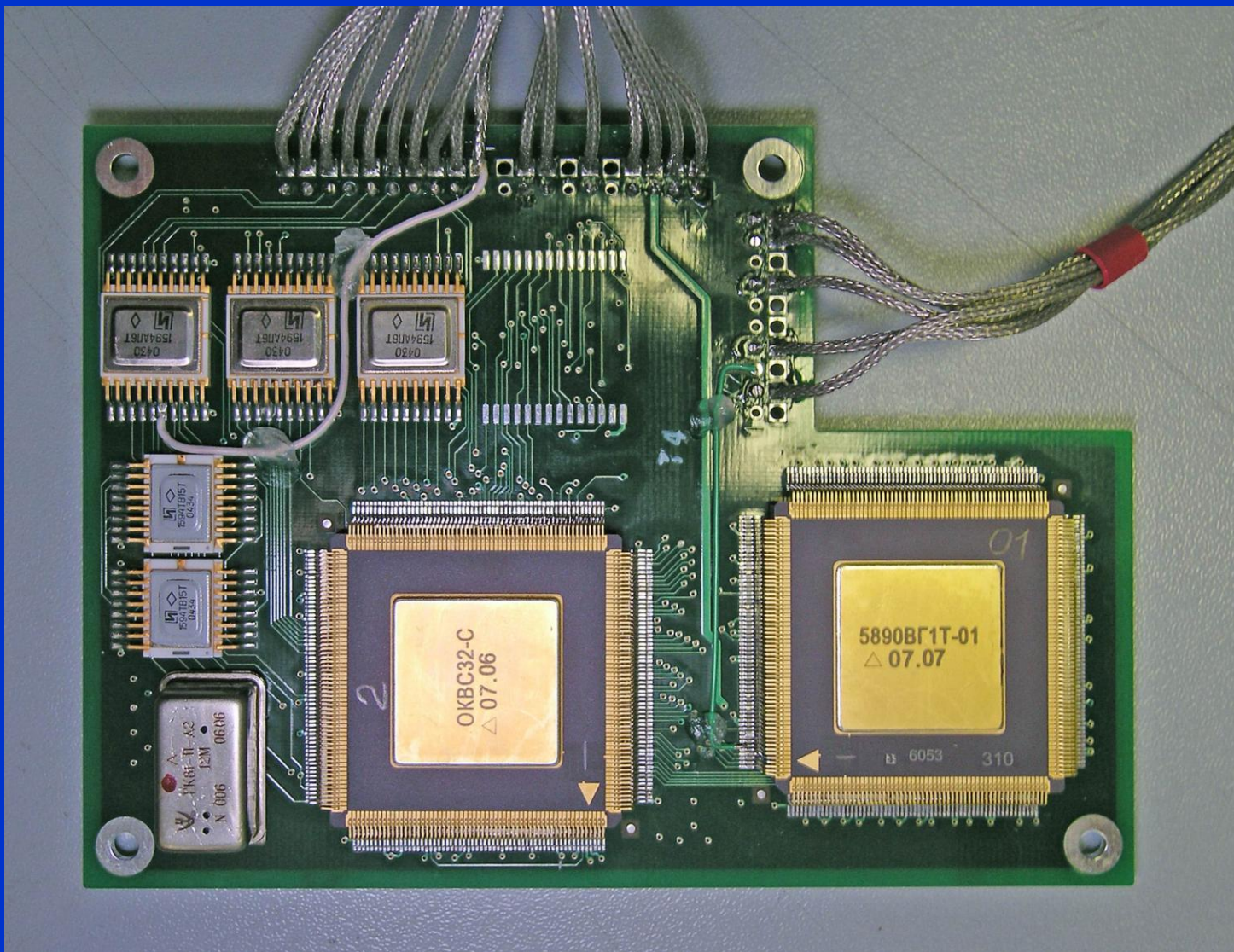
33 МГц, 0,5 КМОП КНИ

## СТАТИЧЕСКОЕ ОЗУ 1Мбит (128К×8)

- ЕМКОСТЬ – 1 Мбит (128К × 8)
- РАЗМЕР КОРПУСА – 18 × 18 мм
- ТЕХНОЛОГИЯ – КНИ 0,35 мкм
- ВРЕМЯ ОБРАЩЕНИЯ – 30 нс
- НАПРЯЖЕНИЕ ПИТАНИЯ – 3,3 В
- ТОК ПОТРЕБЛЕНИЯ – 30 мА
- ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ДИАПАЗОН –  
от – 60 до + 125
- РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ –  
НА УРОВНЕ 5 Ус

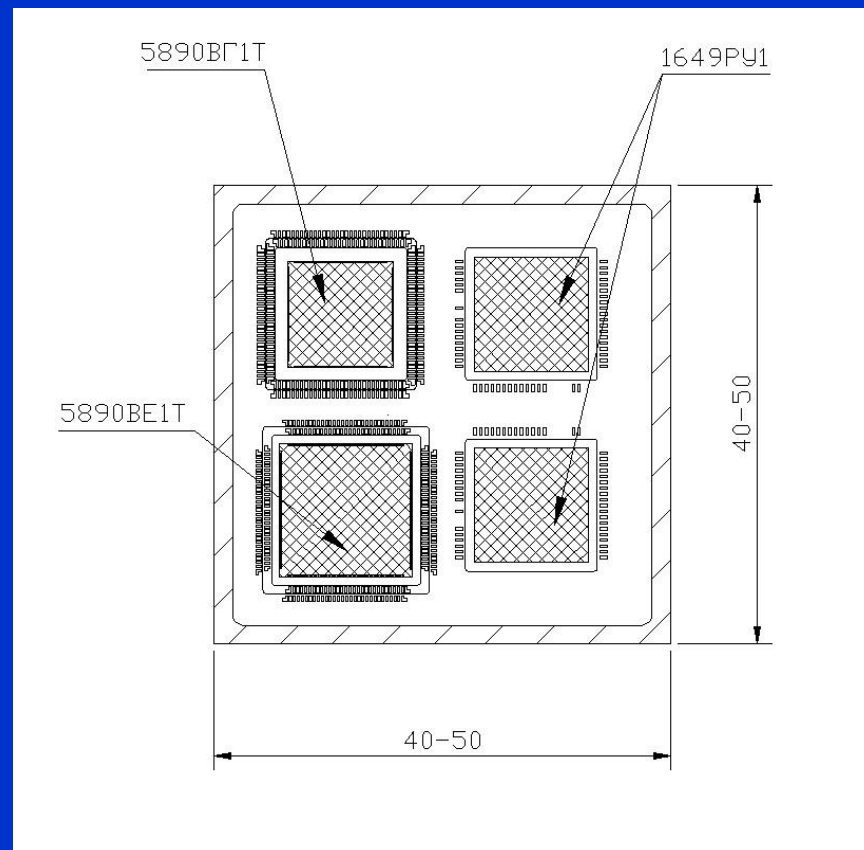
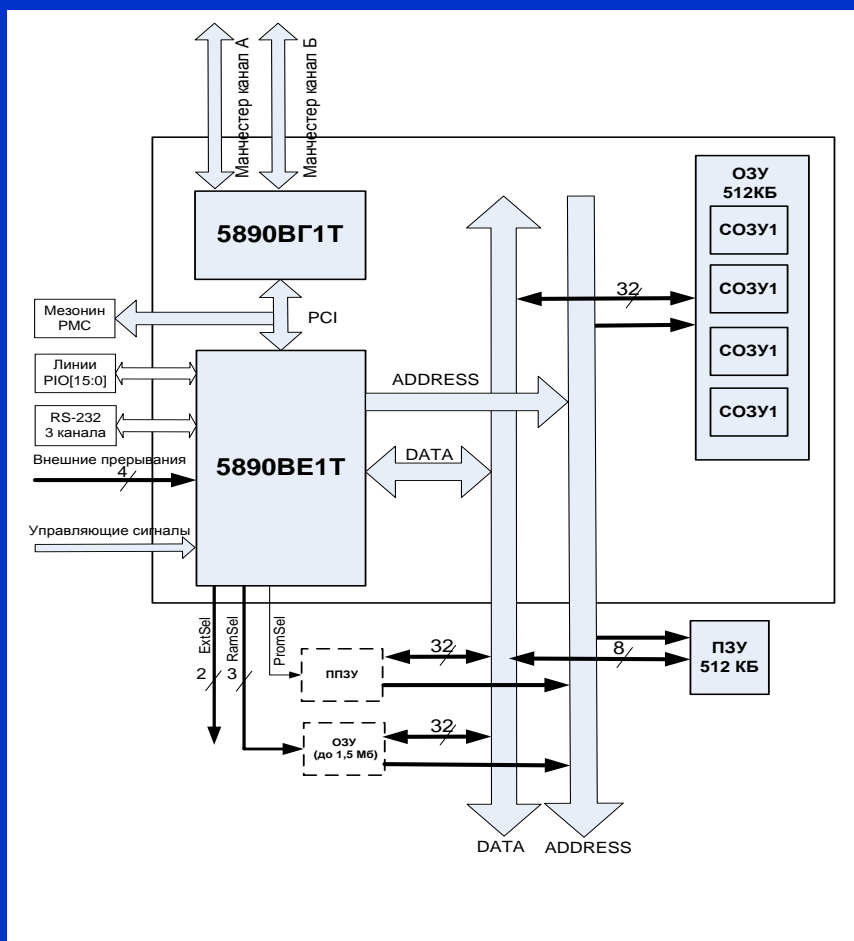


# Технологический модуль для спец.испытаний





# Многокристальный модуль БАГЕТ83-МИКРО

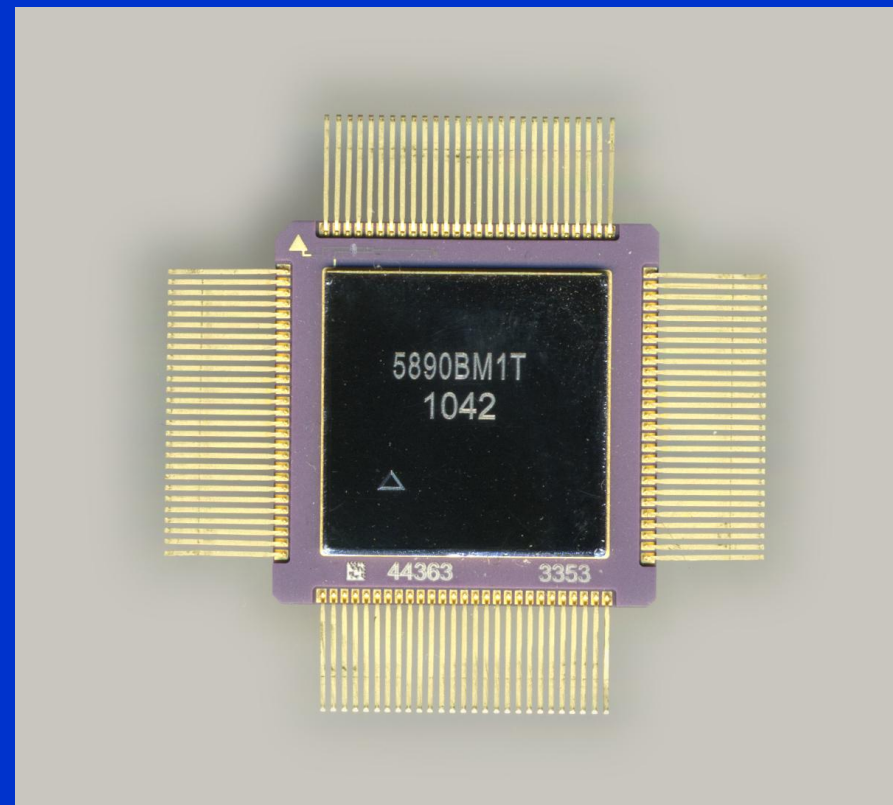


Функционально-законченная, рад.стойкая ЭВМ  
в одном корпусе 50\*50 мм (декабрь 2011 г.)

# 5890BM1T

## Микропроцессор КОМДИВ с повышенной сбоеустойчивостью

- АРХИТЕКТУРА МП - КОМДИВ
- РАБОЧАЯ ЧАСТОТА 33 МГц
- ТЕХНОЛОГИЯ – КНИ 0,5 мкм
- НАПРЯЖЕНИЕ ПИТАНИЯ – 3,3 В
- ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ДИАПАЗОН –  
*от – 60 до + 125*
- РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ  
5Ус (7И<sub>7</sub> – 4\*4Ус)

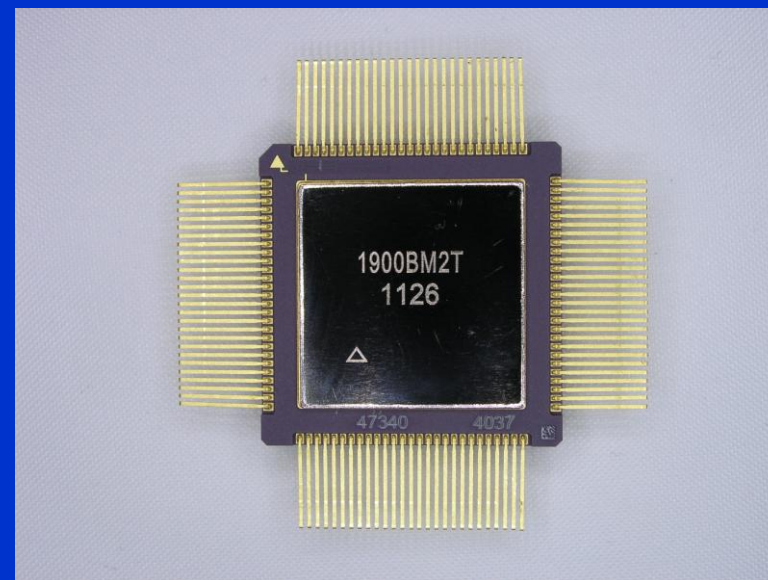


Защита кэш-памяти битами четности (1 бит на каждый байт) + стратегия записи кэш-памяти cache-through повысила сбоеустойчивость на 3 порядка!!!

# 1900BM2T

## 32-разрядный микропроцессор с резервированием на уровне блоков с самовосстановлением после сбоя

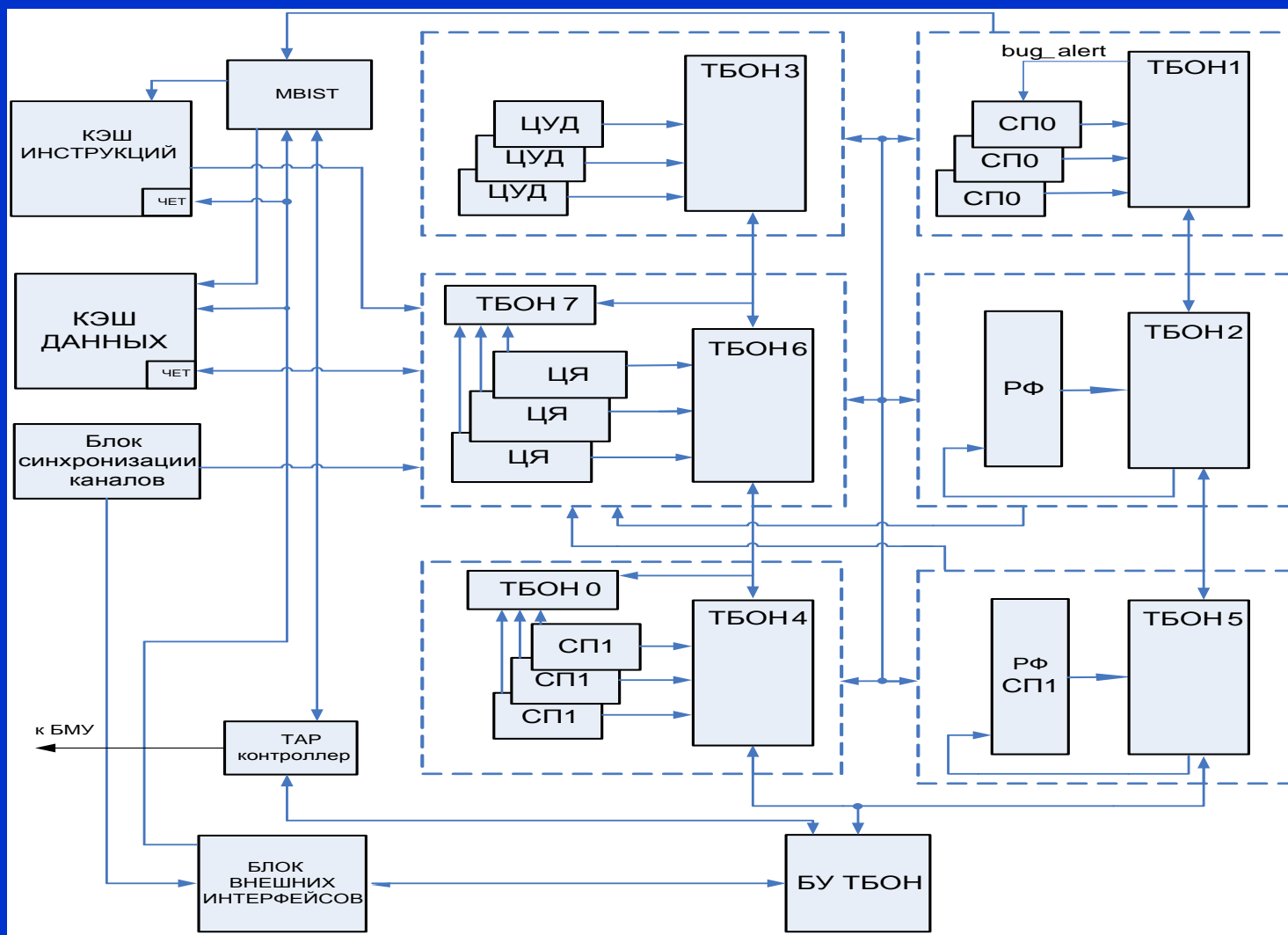
- АРХИТЕКТУРА МП - КОМДИВ
- РАБОЧАЯ ЧАСТОТА 66 МГц
- ТЕХНОЛОГИЯ – КНИ 0,35 мкм
- НАПРЯЖЕНИЕ ПИТАНИЯ – 3,3 В
- ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ДИАПАЗОН –  
*от – 60 до + 125*
- РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ 5Ус  
(7И<sub>7</sub> – 4\*4Ус)



- Тройное резервирование на уровне блоков с самовосстановлением
- Реализация кэш-памяти на сбоеустойчивых ячейках типа DICE
- Защита кэш-памяти битом четности + режим записи write-through
- Сбоеустойчивые библиотечные ячейки для нерезервируемых элементов (схемы управления кэш-памятью, элементы внешнего интерфейса)
- Патентованные решения для защиты регистрового файла
- Элементы сбора статистики по сбоям, позволяющие определить факт отказа

# 1900BM2T

## 32-разрядный микропроцессор с резервированием на уровне блоков с самовосстановлением после сбоя



66 МГц, 0,35 КМОП КНИ

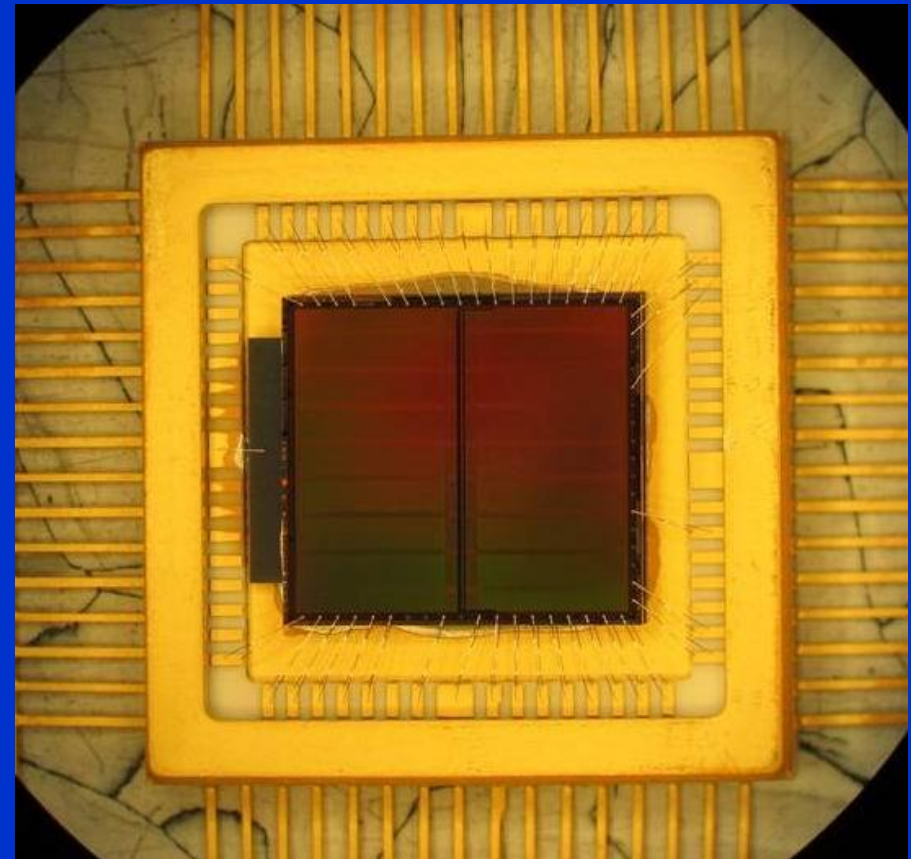
## Результаты испытаний на ТЗЧ (ОИЯИ, г.Дубна) ноябрь 2010 г.

Микросхема	Сечение насыщения, см <sup>2</sup> /СБИС
1890ВМ1Т	2,19 10 <sup>-2</sup>
1890ВМ2Т	8,62 10 <sup>-2</sup>
5890ВМ1Т	< 9 10 <sup>-5</sup>
1900ВМ2Т (макетные образцы*)	< 1 10 <sup>-6</sup>

\* - Ожидается снижение сечения сбоев минимум на порядок для опытных образцов

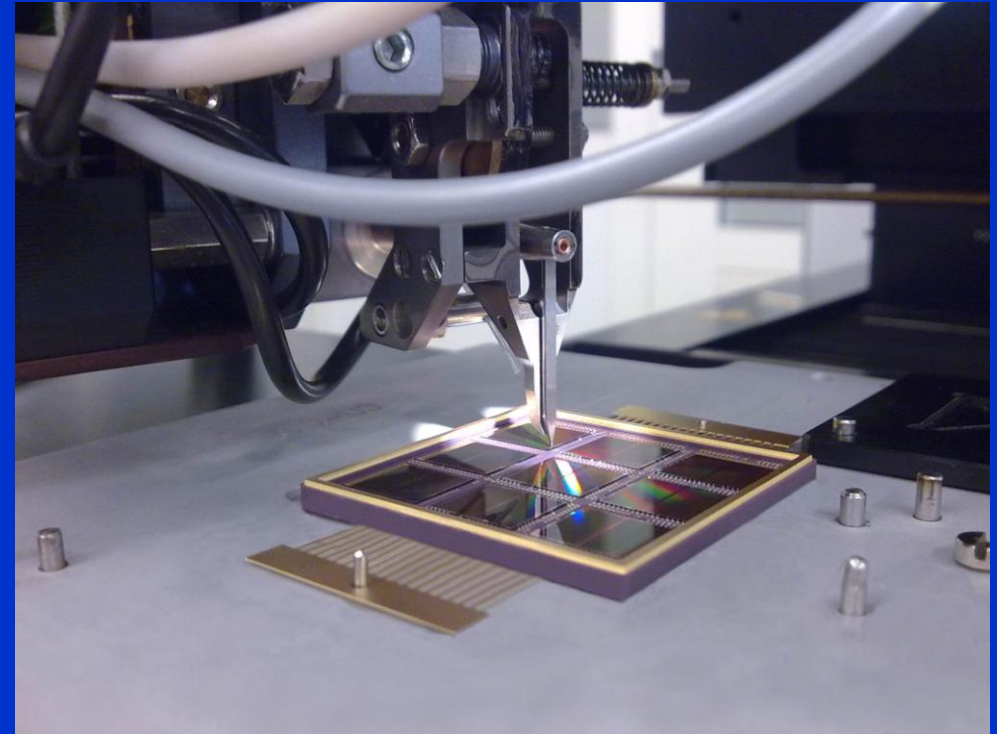
# ДВУХКРИСТАЛЬНЫЙ МОДУЛЬ СТАТИЧЕСКОГО ОЗУ (этажерочная сборка)

- ЕМКОСТЬ – 2 Мбит (256К 8)
- РАЗМЕР КОРПУСА – 18 18 мм
- ТЕХНОЛОГИЯ – КНИ 0,35 мкм
- ВРЕМЯ ОБРАЩЕНИЯ – 30 нс
- НАПРЯЖЕНИЕ ПИТАНИЯ – 3,3 В
- ТОК ПОТРЕБЛЕНИЯ – 30 мА
- ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ДИАПАЗОН –  
от – 60 до + 125
- РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ –  
НА УРОВНЕ 5 Ус



# ВОСЬМИКРИСТАЛЬНЫЙ МОДУЛЬ СТАТИЧЕСКОГО ОЗУ

- ЕМКОСТЬ – 8 Мбит (1М 8)
- ТЕХНОЛОГИЯ – КНИ 0,35 мкм
- ВРЕМЯ ОБРАЩЕНИЯ – 40 нс
- НАПРЯЖЕНИЕ ПИТАНИЯ – 3,3 В
- ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ДИАПАЗОН –  
от – 60 до + 125
- РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ 5Ус  
(7И<sub>7</sub> – 4\*4Ус)



# Сравнение микропроцессоров для космических применений

Микропроцессор	RAD750	UT699	HXRHPPC	RAD-Hard BRE440	<b>5890BE1T</b>	<b>1900BM2T</b>
Компания	BAE Systems	Aeroflex	Honeywell	Broad Reach Engineering	НИИСИ РАН	НИИСИ РАН
Архитектура	PowerPC	SPARC	PowerPC	PowerPC	<b>КОМДИВ</b>	<b>КОМДИВ</b>
Технология, мкм	<b>0,15</b>	<b>0,25</b>	<b>0,35 КНИ</b>	<b>0,15 КНИ</b>	<b>0,5 КНИ</b>	<b>0,35 КНИ</b>
Частота, МГц	<b>200</b>	<b>66</b>	<b>80</b>	<b>83</b>	<b>33</b>	<b>66</b>
Год начала производства	<b>2010</b>	<b>2010</b>	<b>2008</b>	<b>2010</b>	<b>2009</b>	<b>2011</b>



## Перспективные работы 0,25 КМОП КНИ (2012-2014 г.г.)

Сбоеустойчивая система на кристалле	32-разрядное сбоеустойчивое процессорное ядро, интерфейсы по ГОСТ Р 52070-2003, SpaceWire
Сбоеустойчивая и отказоустойчивая система на кристалле	32-разрядное процессорное ядро, интерфейсы по ГОСТ Р 52070-2003, SpaceWire. 3- 4-х кратное резервирование на кристалле
Универсальный 64-разрядный микропроцессор	64-разрядный микропроцессор, совместимый с 1890ВМ5Ф. Частота 150 МГц.
Микропроцессор для цифровой обработки сигналов	Микропроцессор, совместимый с 1890ВМ7Я. Производительность 2 ГФлопс
Коммутатор каналов RapidIO	Коммутатор на 8 последовательных каналов RapidIO
Статическая ОЗУ	Статическая ОЗУ емкостью до 16 Мбит

**Спасибо за внимание!!**