

# **Автоматизация проектирования быстродействующих, компактных и радиационно-стойких ячеек СОЗУ**

**МЭС - 2020**

***Бардушкин Андрей Владимирович***

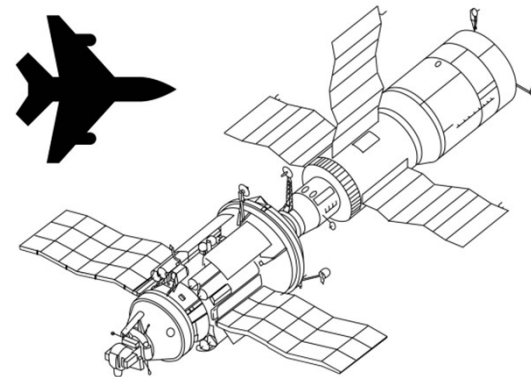
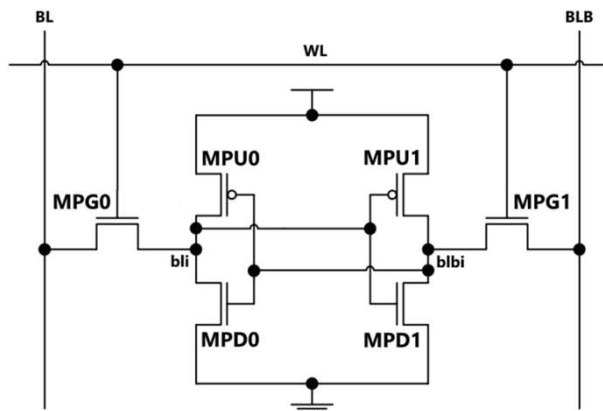
***ООО «Альфачип»***

***Зеленоград  
ноябрь 2020***

# Средство автоматизации проектирования ячеек статического ОЗУ

Разработанная программа позволяет автоматизировать процесс оптимизации схемотехнических параметров приборов 6-транзисторной ячейки статического ОЗУ в соответствии с критериями:

- максимального быстродействия;
- максимальной плотности топологии;
- стойкости к одиночным воздействиям тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ).



# Входные и выходные данные

## Входные данные:

- технологические параметры (процесс, модели, PVT, ...);
- длина канала  $L$ , минимальная ширина транзисторов  $\min(W)$ ;
- набор значений WPU, CR и PR;
- максимальная площадь.

WPU =  $\min(W)$

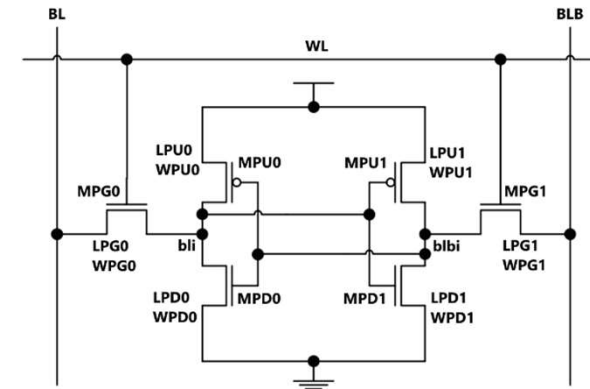
PR \ CR	0,6	0,75	0,9
1,6	WPU = ... WPG = ... WPD = ...	...	...
1,8	...	...	...
2,0	...	...	...
2,2	...	...	...
2,4	...	...	...

WPU = ... \*  $\min(W)$

WPU =  $1,2 * \min(W)$

PR \ CR	0,6	0,75	0,9
1,6	WPU = ... WPG = ... WPD = ...	...	...
1,8	...	...	...
2,0	...	...	...
2,2	...	...	...
2,4	...	...	...

etc.



$$PR = \frac{WPU0 / LPU0}{WPG0 / LPG0}$$

$$CR = \frac{WPD0 / LPD0}{WPG0 / LPG0}$$

Формируется набор ячеек памяти, у которых варьируются следующие параметры:

- Ширина Pull-Up транзистора;
- Pull-Up Ratio (PR);
- Cell Ratio (CR).

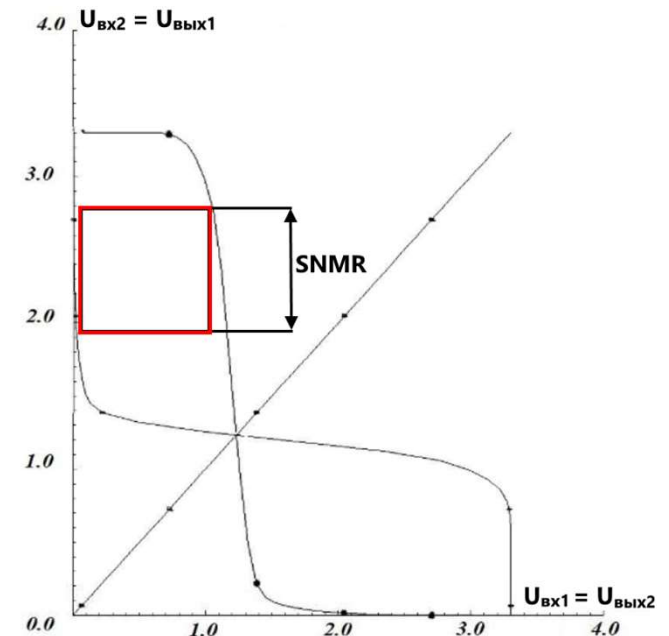
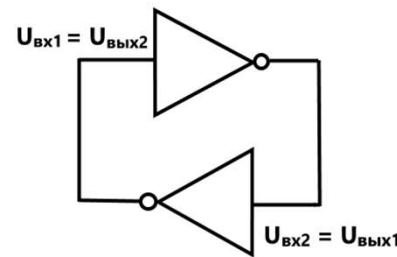
## Выходные данные:

- для каждого сочетания геометрических параметров определяются основные электрические параметры получившейся ячейки памяти и ее площадь;
- все ячейки памяти разделяются на три категории - RH, HP, HD и сортируются по ключевому параметру для каждой их категорий.

# Измеряемые параметры, критерии отбора

## Измеряемые параметры ячеек памяти:

- активный ток ячейки памяти (**I<sub>on</sub>**);
- Статическая помехоустойчивость в режиме чтения (Static Noise Margin Read, **SNMR**);
- Статическая помехоустойчивость в режиме записи (Write Margin, **WM**);
- Ток перезаписи ячейки (Write-Trip Current, **WTI**);
- Ток насыщения Pull-Up транзистора (**I<sub>satp</sub>**).



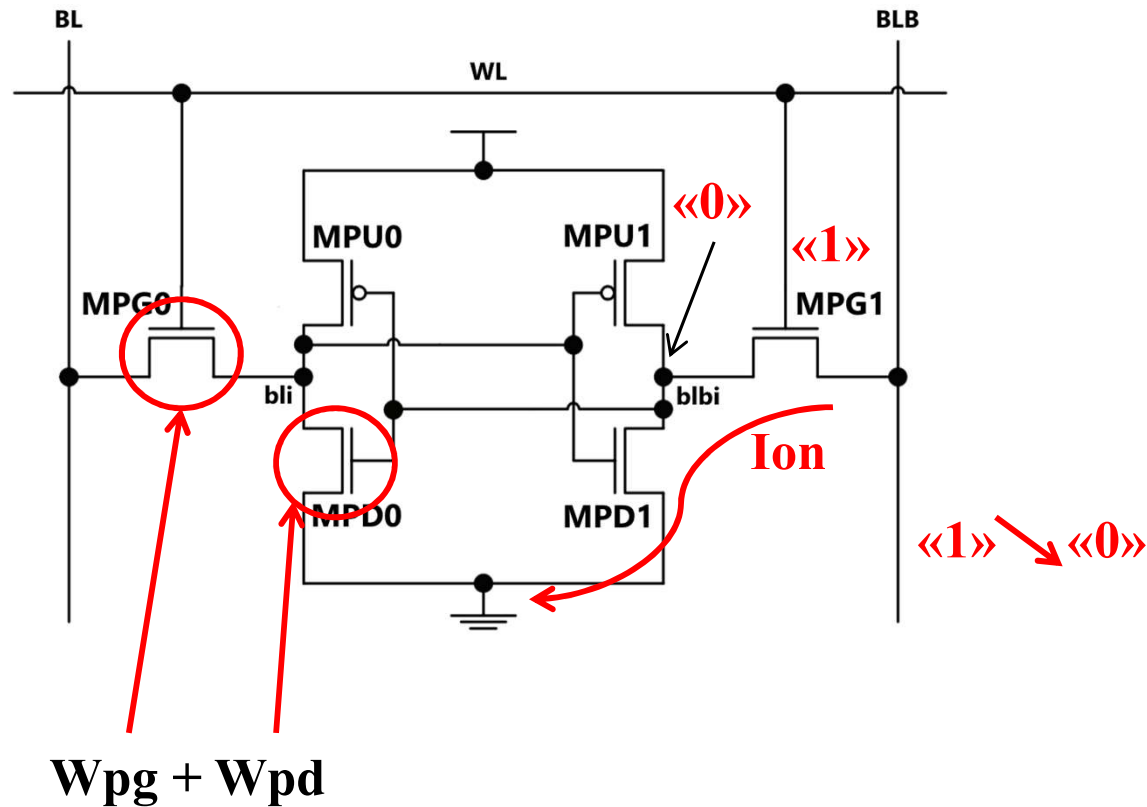
Количество ячеек в наборе может быть сокращено, т.к. проверяется на условия:

- **занимаемая площадь** (условие указывается пользователем);
- **SNMR**;
- **WM**.

# Сортировка ячеек по критериям HD и HP

**HD:**  
 $\min(W_{pd} + W_{pg})$  при  
 $\min(W_{pu})$

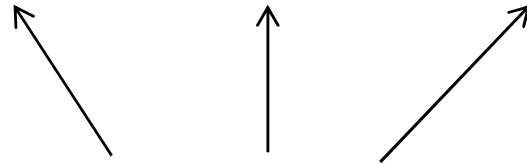
**HP:**  
 $\max(I_{on})$  при  $\min(W_{pu})$



# Сортировка ячеек по критериям RH

**Hardened:**

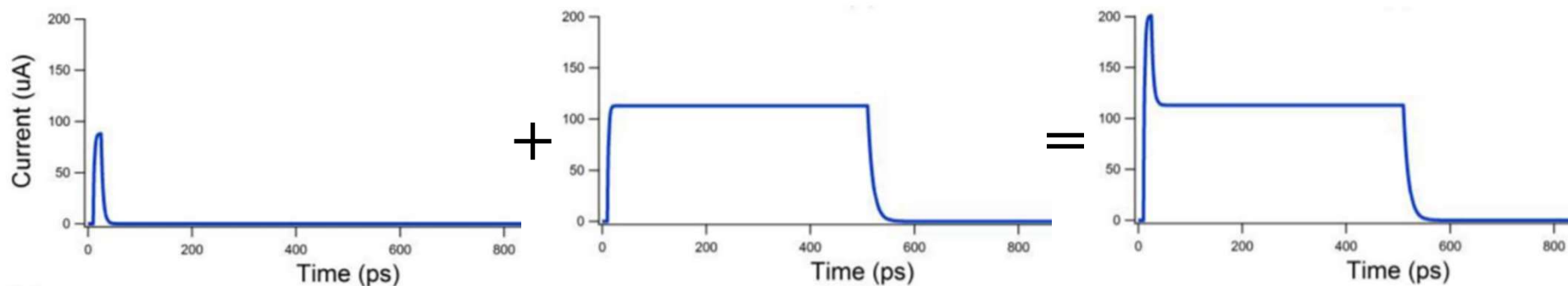
$$(\Delta W_{TI} + \Delta S_{NMR} + \Delta W_{M}) > 0$$



Относительные величины,  
умноженные на полученные  
экспериментально весовые  
коэффициенты

Весовой коэффициент зависит от диапазона варьирования той или иной величины при изменении геометрических параметров ячейки.

# Формирование импульса тока одиночного воздействия

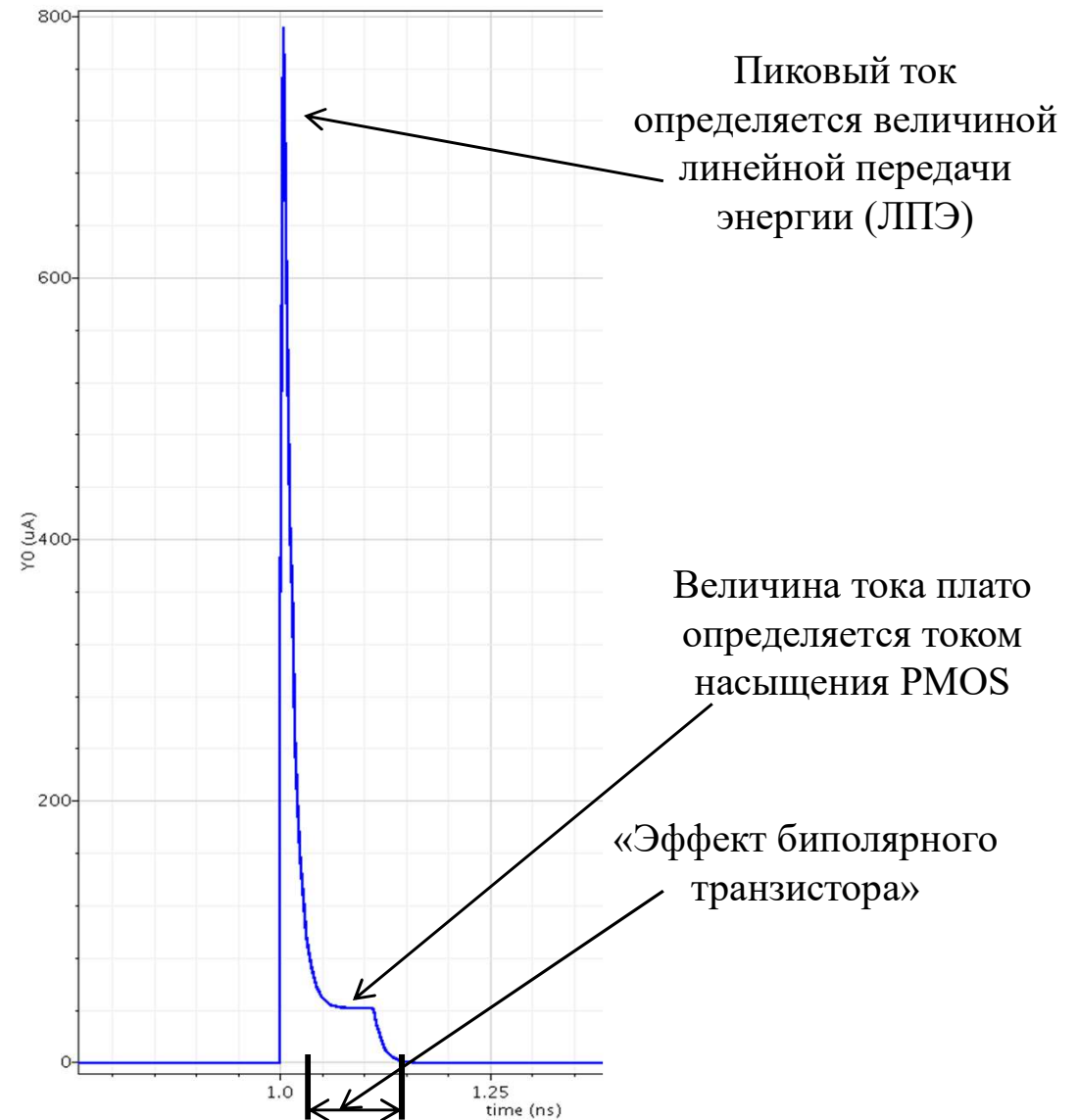


Для моделирования одиночного воздействия тяжелой заряженной частицы применяется **сдвоенный двухэкспоненциальный источник тока**, что позволяет более точно моделировать последствия реального физического процесса ионизации ТЗЧ в приборах, изготовленных по субмикронным технологиям.

# Влияние параметров ТЗЧ на форму импульса тока одиночного воздействия

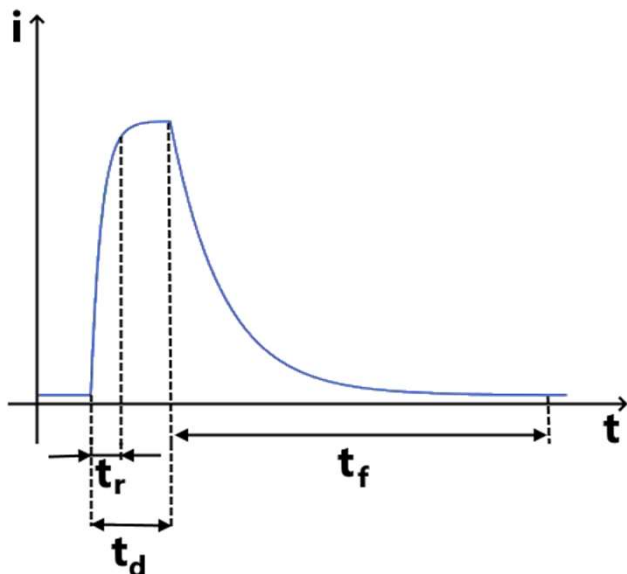
Выбранные стойкие ячейки памяти подвергаются одиночному воздействию ТЗЧ на сток n-МОП Pull-Down транзистора. Форма импульса тока, генерируемая тяжелой заряженной частицей, зависит от нескольких факторов:

- ЛПЭ. В кремнии допустим пересчет  $97 \frac{\text{МэВ} \cdot \text{см}^2}{\text{мг}} = 1 \frac{\text{пКл}}{\text{мкм}}$ . Влияет на пиковое значение тока и длительность «плато» двойного двухэкспоненциального источника.
- Длина пробега ТЗЧ в структуре полупроводника. Определяется глубиной залегания p-n-перехода сток-подложка (или, в случае КНИ, глубиной диффузионной области до слоя диэлектрика). Влияет на величину собранного заряда.
- Ток насыщения p-канального транзистора (Pull-Up транзистора). Влияет на амплитуду тока в области «плато».





# Определение максимальной величины ЛПЭ



**Собранный заряд:**

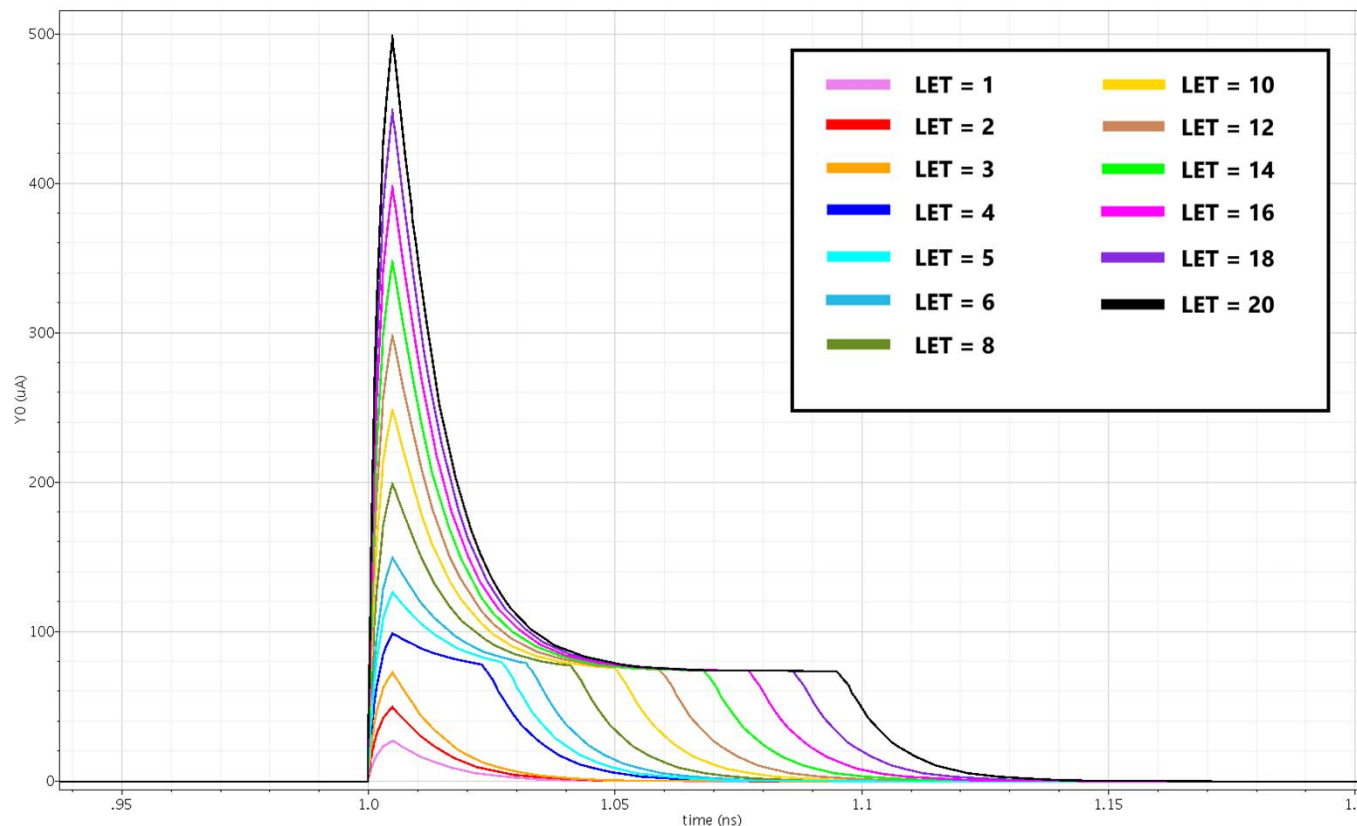
$$Q_{crit} = LET \left[ \frac{\text{пКл}}{\text{МКМ}} \right] \cdot X_j \text{ [МКМ]}$$

( $X_j$  – глубина залегания).

**Пиковый ток:**

$$Q_{peak} = Q_{crit} - Q_{plateau}$$

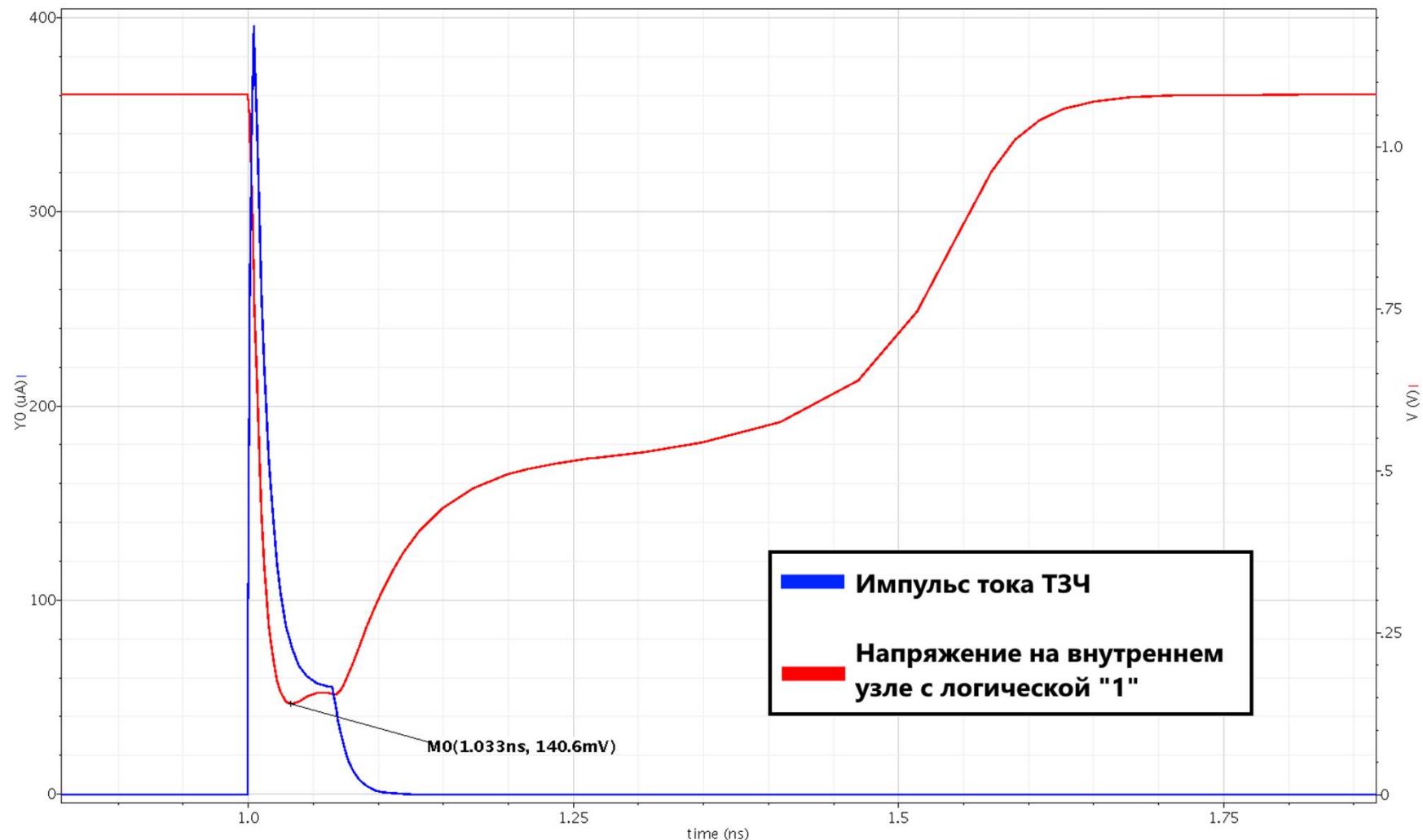
$$I_{peak} = \frac{Q_{peak}}{\left( t_r + t_f + t_d - t_r \cdot \exp\left(-\frac{t_r}{t_d}\right) \right)}$$



Зависимость формы импульса тока от величины ЛПЭ

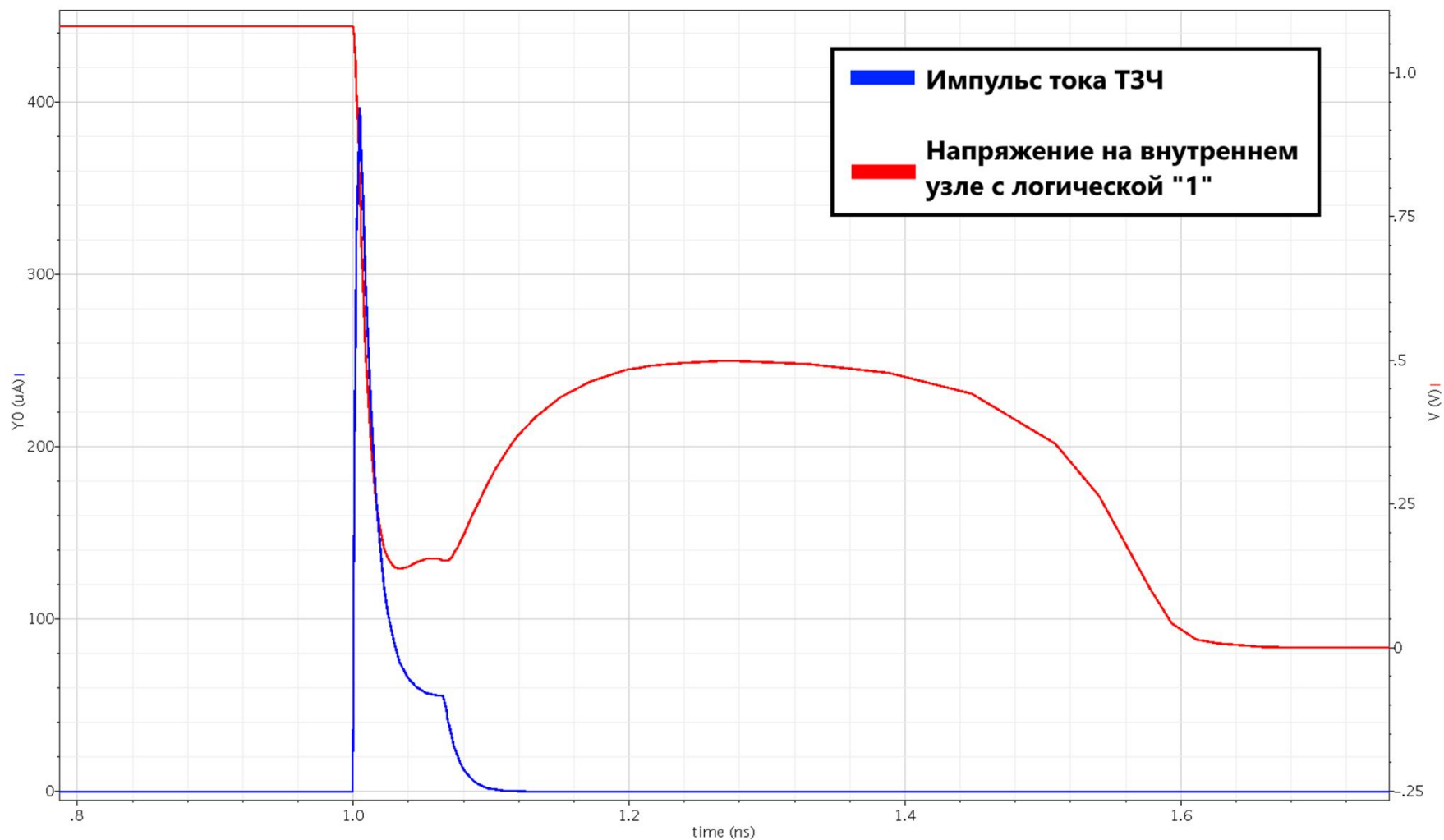
Результатом моделирования одиночного воздействия ТЗЧ является **максимальное значение ЛПЭ**, которое не приводит к изменению записанных данных.

# Пример восстановления записанного состояния



Пограничное значение ЛПЭ для ячейки памяти, изготовленной по 90-нм технологии «Объемный кремний», восстановление сигнала,  $\text{ЛПЭ} = 13,23 \frac{\text{МэВ} \cdot \text{см}^2}{\text{мг}}$

# Пример одиночного сбоя



Пограничное значение ЛПЭ для ячейки памяти, изготовленной по 90-нм технологии «Объемный кремний», одиночный сбой,  $\text{ЛПЭ} = 13,26 \frac{\text{МэВ} \cdot \text{см}^2}{\text{МГ}}$

# Результаты расчёта параметров НД ячеек памяти

Технология, техпроцесс	Минимальная ширина min(W); длина канала (L)	PVT	Геометрические параметры НД-ячейки	Схемотехнические параметры НД-ячейки
180 нм, КНИ	$W_{\min} = 480$ нм $L = 180$ нм	Slow-Slow $V_{dd} = 1,62$ В $T = 125^{\circ}\text{C}$	$L = 180$ нм $W_{pu} = 480$ нм $W_{pd} = 960$ нм $W_{pg} = 530$ нм	$I_{on} = 75,2$ мкА $SNMR = 0,294$ В $WM = 0,496$ В $WTI = 71$ мкА
90 нм, КНИ	$W_{\min} = 260$ нм $L = 90$ нм	Slow-Slow $V_{dd} = 1,08$ В $T = 125^{\circ}\text{C}$	$L = 90$ нм $W_{pu} = 260$ нм $W_{pd} = 520$ нм $W_{pg} = 290$ нм	$I_{on} = 40,1$ мкА $SNMR = 0,267$ В $WM = 0,269$ В $WTI = 19,6$ мкА
90 нм, КМОП	$W_{\min} = 260$ нм $L = 90$ нм	Slow-Slow $V_{dd} = 1,08$ В $T = 125^{\circ}\text{C}$	$L = 90$ нм $W_{pu} = 260$ нм $W_{pd} = 520$ нм $W_{pg} = 290$ нм	$I_{on} = 38,6$ мкА $SNMR = 0,242$ В $WM = 0,299$ В $WTI = 20,7$ мкА
65 нм, КМОП	$W_{\min} = 120$ нм $L = 60$ нм	Slow-Slow $V_{dd} = 0,9$ В $T = 125^{\circ}\text{C}$	$L = 60$ нм $W_{pu} = 120$ нм $W_{pd} = 240$ нм $W_{pg} = 130$ нм	$I_{on} = 41,3$ мкА $SNMR = 0,161$ В $WM = 0,285$ В $WTI = 23,8$ мкА

# Результаты расчёта параметров НР ячеек памяти

Технология, техпроцесс	Минимальная ширина min(W); длина канала (L)	PVT	Геометрические параметры НР-ячейки	Схемотехнические параметры НР-ячейки
180 нм, КНИ	$W_{\min} = 480$ нм $L = 180$ нм	Slow-Slow $V_{dd} = 1,62$ В $T = 125^{\circ}\text{C}$	$L = 180$ нм $W_{pu} = 480$ нм $W_{pd} = 1760$ нм $W_{pg} = 800$ нм	$I_{on} = 118,1$ мкА $SNMR = 0,288$ В $WM = 0,575$ В $WTI = 90,2$ мкА
90 нм, КНИ	$W_{\min} = 260$ нм $L = 90$ нм	Slow-Slow $V_{dd} = 1,08$ В $T = 125^{\circ}\text{C}$	$L = 90$ нм $W_{pu} = 260$ нм $W_{pd} = 950$ нм $W_{pg} = 430$ нм	$I_{on} = 65$ мкА $SNMR = 0,259$ В $WM = 0,297$ В $WTI = 19,8$ мкА
90 нм, КМОП	$W_{\min} = 260$ нм $L = 90$ нм	Slow-Slow $V_{dd} = 1,08$ В $T = 125^{\circ}\text{C}$	$L = 90$ нм $W_{pu} = 260$ нм $W_{pd} = 950$ нм $W_{pg} = 430$ нм	$I_{on} = 59,8$ мкА $SNMR = 0,245$ В $WM = 0,318$ В $WTI = 21,1$ мкА
65 нм, КМОП	$W_{\min} = 120$ нм $L = 60$ нм	Slow-Slow $V_{dd} = 0,9$ В $T = 125^{\circ}\text{C}$	$L = 60$ нм $W_{pu} = 120$ нм $W_{pd} = 440$ нм $W_{pg} = 200$ нм	$I_{on} = 68,1$ мкА $SNMR = 0,152$ В $WM = 0,32$ В $WTI = 26,1$ мкА

# Результаты расчёта параметров РН ячеек памяти

Технология, техпроцесс	Минимальная ширина min(W); длина канала (L)	PVT	Геометрические параметры РН-ячейки	Схемотехнические параметры РН-ячейки
180 нм, КНИ	$W_{\min} = 480$ нм $L = 180$ нм	Slow-Slow $V_{dd} = 1,62$ В $T = 125^{\circ}\text{C}$	$L = 180$ нм $W_{pu} = 960$ нм $W_{pd} = 1070$ нм $W_{pg} = 2350$ нм	$I_{on} = 155,3$ мкА $SNMR = 0,31$ В $WM = 0,482$ В $WTI = 141,2$ мкА $LET = 23,41$
90 нм, КНИ	$W_{\min} = 260$ нм $L = 90$ нм	Slow-Slow $V_{dd} = 1,08$ В $T = 125^{\circ}\text{C}$	$L = 90$ нм $W_{pu} = 520$ нм $W_{pd} = 580$ нм $W_{pg} = 1270$ нм	$I_{on} = 87,1$ мкА $SNMR = 0,264$ В $WM = 0,275$ В $WTI = 35,4$ мкА $LET = 23,63$
90 нм, КМОП	$W_{\min} = 260$ нм $L = 90$ нм	Slow-Slow $V_{dd} = 1,08$ В $T = 125^{\circ}\text{C}$	$L = 90$ нм $W_{pu} = 520$ нм $W_{pd} = 580$ нм $W_{pg} = 1270$ нм	$I_{on} = 79,4$ мкА $SNMR = 0,257$ В $WM = 0,274$ В $WTI = 42$ мкА $LET = 13,23$
65 нм, КМОП	$W_{\min} = 120$ нм $L = 60$ нм	Slow-Slow $V_{dd} = 0,9$ В $T = 125^{\circ}\text{C}$	$L = 60$ нм $W_{pu} = 240$ нм $W_{pd} = 270$ нм $W_{pg} = 590$ нм	$I_{on} = 92,2$ мкА $SNMR = 0,158$ В $WM = 0,297$ В $WTI = 43,7$ мкА $LET = 5,57$

# Сравнение параметров РН ячеек памяти

Технология, техпроцесс	Минимальная ширина min(W); длина канала (L)	PVT	Параметры «стойкой» ячейки, нм			Макс. величина ЛПЭ, МэВ*см <sup>2</sup> /мг
			W <sub>pu</sub>	W <sub>pg</sub>	W <sub>pd</sub>	
180 нм, КНИ	W <sub>min</sub> = 480 нм L = 180 нм	Slow-Slow Vdd = 1,62 В T = 125°C	720	1200	2280	21,19
			720	1200	2400	21,48
			960	1070	2130	22,75
			720	960	2110	20,51
			720	1200	2520	21,92
			720	960	2020	20,36
			960	1070	2030	22,56
			960	1070	2240	23,05
90 нм, КНИ	W <sub>min</sub> = 260 нм L = 90 нм	Slow-Slow Vdd = 1,08 В T = 125°C	390	650	1300	19,63
			390	650	1170	19,14
			520	580	1160	23,24
			520	580	1270	23,63
			520	580	1040	22,75
			390	520	1140	18,95
90 нм, КМОП	W <sub>min</sub> = 260 нм L = 90 нм	Slow-Slow Vdd = 1,08 В T = 125°C	390	650	1300	11,82
			520	580	1160	12,6
			390	430	950	9,57
			520	580	1270	13,23
			520	580	1040	11,91
			390	520	1140	10,84
65 нм, КМОП	W <sub>min</sub> = 120 нм L = 60 нм	Slow-Slow Vdd = 0,9 В T = 125°C	240	270	530	5,37
			240	270	590	5,57
			180	240	530	4,3

## *Заключение*

- Разработана программа для автоматизации разработки ячеек памяти различных типов:
  - с высокой плотностью топологии;
  - с максимальным быстродействием;
  - стойких к одиночным воздействиям:
    - создан механизм формирования импульса тока, эмулирующего одиночное воздействие ТЗЧ на ячейку памяти, реализованную по субмикронным технологиям;
    - разработан метод определения максимальных значений линейной передачи энергии, при которых ячейки памяти способны сохранять записанную информацию.



# Список литературы

- A. Pavlov and M. Sachdev, "CMOS SRAM Circuit Design and Parametric Test in Nano-scaled Technologies", Springer, 2008.
- E. Grossar, M. Stucchi, K. Maex and W. Dehaene, "Read Stability and Write-Ability Analysis of SRAM Cells for Nanometer Technologies," in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 41, no. 11, pp. 2577-2588, Nov. 2006.
- Re'mi Gaillard. Single Event Effects: Mechanisms and Classification // *Soft Errors In Modern Electronic Systems* (pp.27-54).
- P. E. Dodd and L. W. Massengill, "Basic mechanisms and modeling of single-event upset in digital microelectronics," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 50, no. 3, pp. 583-602, June 2003.
- Black, D. A. Modeling of Single Event Transients With Dual Double – Exponential Current Sources: Implication for Logic Cell Characterization / D. A. Black [and others] // *IEEE Transactions on nuclear science*. – 2015. - №4. – С.1540 – 1549.
- J. S. Kauppila et al., "A Bias-Dependent Single-Event Compact Model Implemented Into BSIM4 and a 90 nm CMOS Process Design Kit," in *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 56, no. 6, pp. 3152-3157, Dec. 2009, doi: 10.1109/TNS.2009.2033798.
- Петросянц К.О., Харитонов И.А., Орехов Е.В., Самбурский Л.М., Ятманов А.П., Воеводин А.В. Исследование стойкости к воздействию отдельных ядерных частиц ячеек КНИ КМОП ОЗУ методами смешанного 3D TCAD-SPICE моделирования. Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем - 2012. Сборник трудов / под общ. ред. академика РАН А.Л. Стемпковского. М.: ИППМ РАН, 2012. С. 413-418.
- Лазерные методы оценки стойкости КМОП БИС к тиристорным эффектам при воздействии отдельных ядерных частиц : автореферат дис. ... кандидата технических наук : 05.13.05 / Печенкин Александр Александрович; [Место защиты: Нац. исслед. ядерный ун-т]. - Москва, 2012. - 26 с.
- Процессы и оборудование микротехнологии. Часть 1 / Ю.Б. Цветков. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 168 с. : ил.

# Спасибо за внимание!

ООО «Альфачип»  
124498, Москва, Зеленоград,  
пл. Шокина, д. 1, стр. 8.  
Инженер  
Бардушкин А.В.  
E-mail: [bardushkin@alphachip.ru](mailto:bardushkin@alphachip.ru)