



TCAD-SPICE МОДЕЛИРОВАНИЕ СУБМИКРОННЫХ И НАНОМЕТРОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КМОП СБИС С УЧЕТОМ РАДИАЦИОННЫХ И ТЕПЛОВЫХ ЭФФЕКТОВ В РАМКАХ РОССИЙСКО-КИТАЙСКОГО ПРОЕКТА

К. О. Петросянц^{1,2}

¹ НИУ ВШЭ (Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова), Москва



² Институт проблем проектирования в микроэлектронике Российской академии наук (ИППМ РАН), Зеленоград, Москва



Содержание

Введение: цели и задачи проекта

1. Научно-технические заделы участников проекта

- с российской стороны: библиотеки TCAD и SPICE RAD-THERM моделей микро- и нанометровых компонентов КМОП СБИС;
- с китайской стороны: тестовые структуры и приборы SOI FD MOSFET и FinFET, результаты измерений характеристик приборов under test в диапазонах температур и радиационных воздействий.

2. Промежуточные результаты выполнения проекта:

- TCAD модели и SPICE модели 0,2 мкм SOI и Double-SOI MOSFET структур при воздействии γ -излучения;
- оценка чувствительности 4Т ячеек SRAM на структурах 0,2 мкм SOI и Double-SOI MOSFET к воздействию ОЯЧ с помощью TCAD-SPICE моделирования;
- TCAD и SPICE модели FinFET (Vanderbilt Univ. и IMECAS);
- low-T SPICE модели 28 нм bulk MOSFET и 0,18 мкм SOI MOSFET.

3. Совместные публикации в 2020 году.

4. Планы на 2021 год.

Цели и задачи проекта

Исследование радиационных эффектов в наноразмерных MOSFET, в том числе, со структурой 28 нм FD SOI и 22 нм FinFET с целью создания соответствующих тестовых структур, радиационных экспериментов и расчетных моделей.

Обязательства сторон:

А. Китайская сторона. (Институт микроэлектроники НАН Китая) – изготовление тестовых структур и приборов, радиационные эксперименты, измерения электрических характеристик приборов.

Б. Российская сторона. (ИППМ РАН) построение TCAD и SPICE-моделей, экстракция параметров моделей из результатов измерений, предоставленных китайскими партнерами.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЗАДЕЛ РОССИЙСКОГО КОЛЛЕКТИВА

ДВЕ БИБЛИОТЕКИ МОДЕЛЕЙ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ ДЛЯ САПР СБИС

- ❖ TCAD-RAD-THERM моделей п/п структур в среде Sentaurus Synopsys;
- ❖ SPICE RAD-THERM моделей дискретных п/п приборов и компонентов ИС, встроенных в HSPICE, LTSPICE, OrCad, Eldo, Spectre, СИМИКА и др.

Обе библиотеки содержат:

1. модели МОПТ, МОПТ КНИ/КНС, Si БТ, SiGe ГБТ, GaAs/GaN MESFET, мощных ДМОПТ, БТ, IGBT и др., учитывающие влияние нейтронов, электронов, гамма- и рентгеновских лучей, протонов, импульсного излучения, одиночных ядерных частиц;
2. модели приборов п. 1, учитывающие влияние внешней высокой температуры (до +300°C) и внутреннего эффекта «саморазогрева»;
3. модели приборов п. 1, учитывающие влияние низких (до -263°C) температур (для схем криогенной электроники);
4. модели пассивных компонентов и межсоединений в виде компактных пассивных $R_t C_t L_t$ цепей с температуро-зависимыми параметрами.

Модели превышают зарубежный уровень по части учета ВВФ; аттестованы рядом ведущих отечественных предприятий.

Основные преимущества:

- отработанная система экстракции параметров, доступная и понятная разработчикам;
- учет совместного влияния нескольких ВВФ и эффектов старения;
- расширенный температурный диапазон (-263...+300°C)

ПУБЛИКАЦИИ РОССИЙСКОГО КОЛЛЕКТИВА В 2016-2020 ГОДАХ

В рейтинговых международных журналах:

- 1. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2016. Vol. 63. No. 4. P. 2016 - 2021 (Q2)**
- 2. Microelectronics and Reliability. 2017. Vol. 79. P. 416-425 (Q2)**
- 3. Journal of Electronic Testing: Theory and Applications (JETTA). 2017. Vol. 33. No. 1. P. 37-51 (Q3)**
- 4. Sensors and Transducers. 2018. Vol. 227. No. 11. P. 42-50**
- 5. Energies. 2020. Vol. 13. No. 12, 3054. P. 1-17 (Q1)**
- 6. Cryogenics. 2020. Vol. 108. P. 1-6 (Q2)**
- 7. IEEE Tran. On Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2020 (Q2)**

Выступления на конференциях: RADECS, Semi-Therm, THERMINIC, MicDAT, EWDTs и др.

ВЫСОКОРЕЙТИНГОВЫЕ ЖУРНАЛЫ, В КОТОРЫХ КИТАЙЦЫ ССЫЛАЛИСЬ НА НАШИ ПУБЛИКАЦИИ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ (2014-2019 ГГ.)

- 1. Microelectronics Reliability**
- 2. Journal of Nuclear Science and Technology**
- 3. IEEE journal of Solid-State Circuits**
- 4. ECS Journal of Solid-State Science and Technology**
- 5. Electronics**
- 6. Nuclear Inst. And Methods in Physics Research, A**
- 7. Intern. Journal of Electronics and Communication**
- 8. Chinese Physics B**

КИТАЙСКИЕ ОРГАНИЗАЦИИ, СОТРУДНИКИ КОТОРЫХ ССЫЛАЮТСЯ В СВОИХ ПУБЛИКАЦИЯХ НА НАШИ РАБОТЫ

- **Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an;**
- **China Institute of Atomic Energy, Beijing;**
- **Airforce Engineering University, Xi'an;**
- **Institute of Electronics Engineering, China Academy of Engineering Physics, Chengdu;**
- **Institute of Microelectronics, China Academy of Sciences, Beijing**

Научно-технический задел китайского коллектива

1. Наличие технологий изготовления суб-мкм и нм-КМОП СБИС, опыт в исследовании тестовых структур;
2. Владение навыками TCAD и SPICE моделирования с учетом влияния радиации и температуры;
3. Наличие многочисленных публикаций в ведущих высокорейтинговых мировых журналах;
4. Сотрудники китайской команды проходили научную стажировку:
 - в США (Vanderbilt University) у Daniel Fleetwood, Ronald Schrimpf, Robert Reed;
 - во Франции (IMEP-LAHC, Minatec, Grenoble INP, University Grenoble Alps) у Sorin Cristoloveanu.

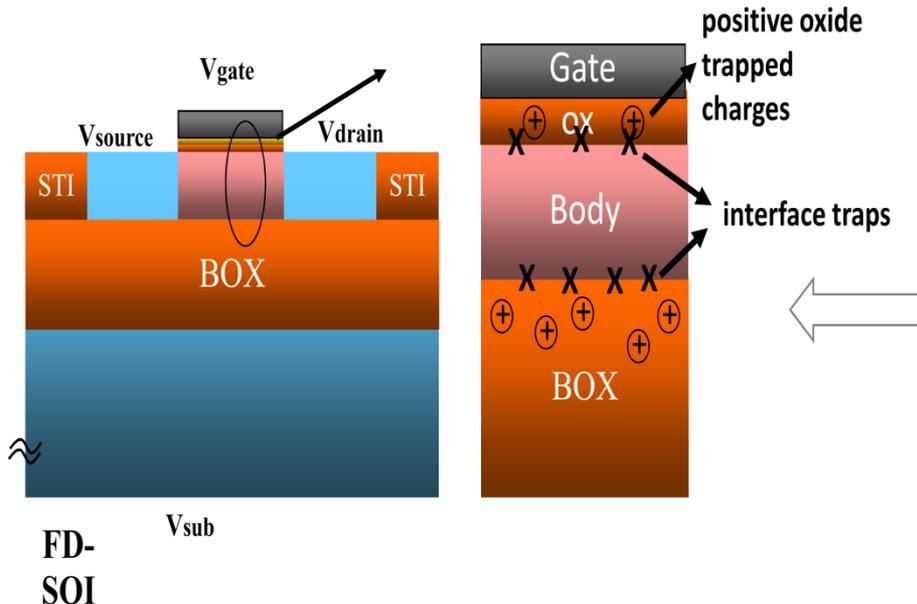
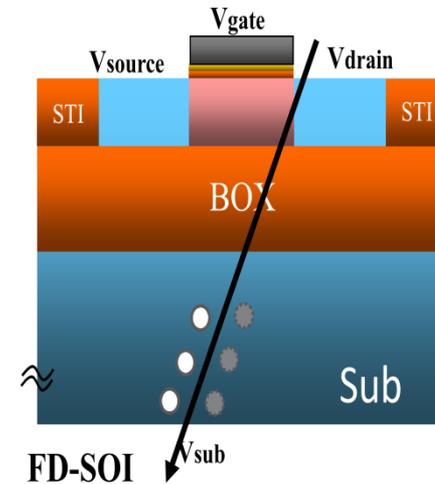
Научно-технический задел китайского коллектива

DSOI nMOSFET TID Experimental Details by IMECAS

SOI

Advantages:

good **SEU suppression** because of the buried oxide isolation (BOX)



Disadvantages:

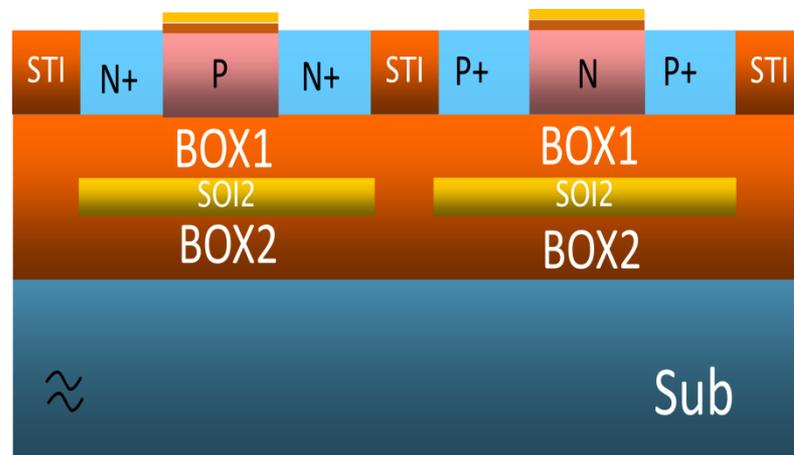
the **TID effect** is even worse in FDSOI because of the introduction of the buried oxide layer (BOX) and the coupling effect between the front and back gate

Научно-технический задел китайского коллектива

DSOI nMOSFET TID Experimental Details
by IMECAS

DSOI

has an additional Si layer
(SOI2)



With SOI2 (Advantages):

- **compensation of TID effect**

V_{SOI2} controls the positive trapped charges in the oxide

- **compensate NMOS and PMOS separately**

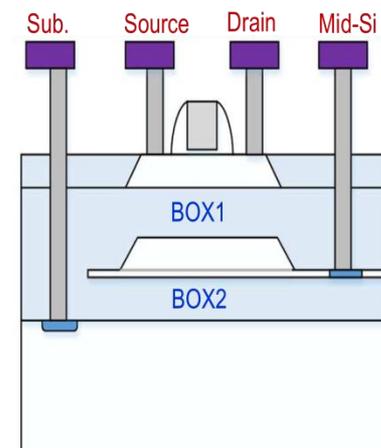
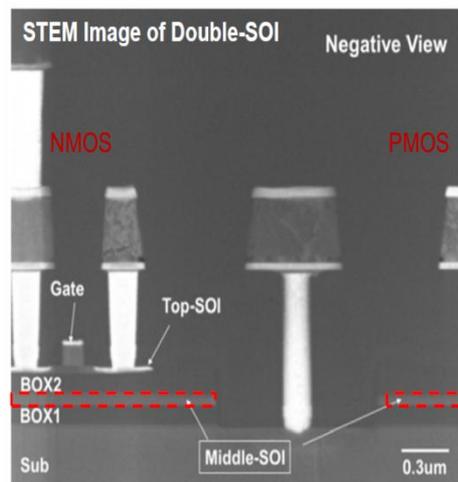
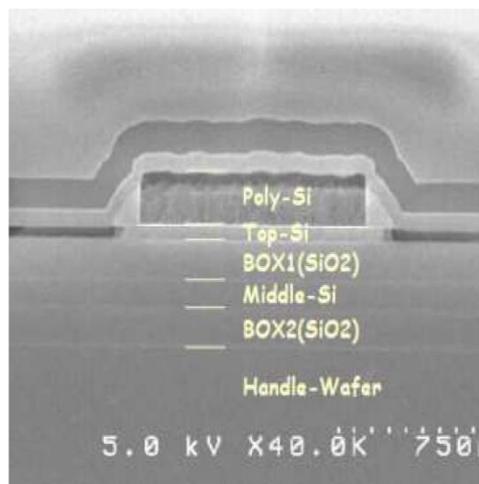
the compensation voltages needed for NMOS and PMOS are different

- **reduction of back-gate effect**

the back-gate effect can be suppressed with SOI2 biased at a constant voltage

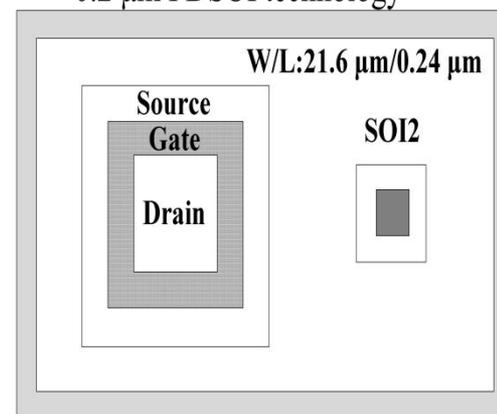
Научно-технический задел китайского коллектива

Device Structure*



0.2 μm FDSOI technology

Device Structure Parameters	Value (nm)
Gate Oxide Thickness (T_{ox})	4.5
Top Silicon Layer Thickness (T_{SOI1})	50
Buried Oxide Layer 1 Thickness (T_{BOX1})	150
Middle Silicon Layer Thickness (T_{SOI2})	80
Buried Oxide Layer 2 Thickness (T_{BOX2})	150



*IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE,
VOL. 65, NO. 8, August 2018

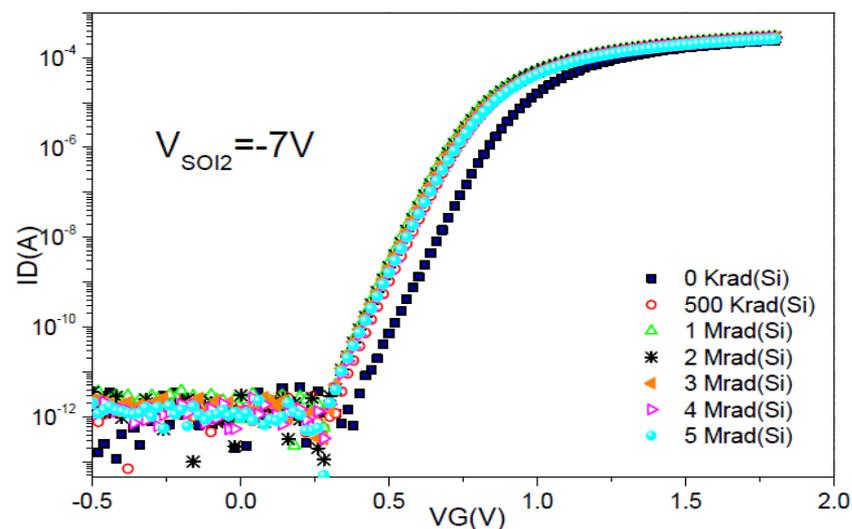
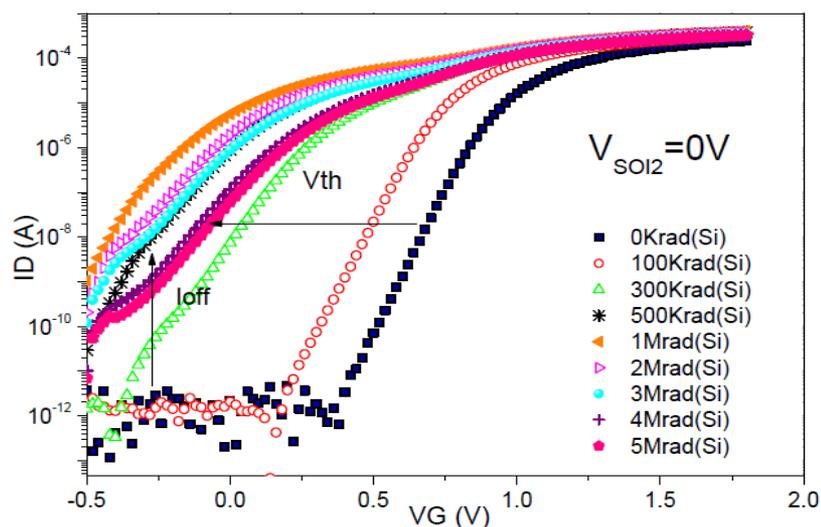
Enclosed gate is used to avoid the leakage current from the lateral parasitic transistor.

Научно-технический задел китайского коллектива

SOI vs DSOI*

➤ TID Experimental Results of DSOI(0.2 μ m FD NMOS

- ✓ Irradiation state: OFF
- ✓ Irradiation dose rate: 50rad(Si)/s
- ✓ Irradiation dose: high up to 5Mrad(Si), by ^{60}Co γ -ray



IV shift negatively due to radiation induced holes.

By applying V_{SOI2} properly, IV curves can be recovered.

Научно-технический задел китайского коллектива

TCAD model for DSOI*

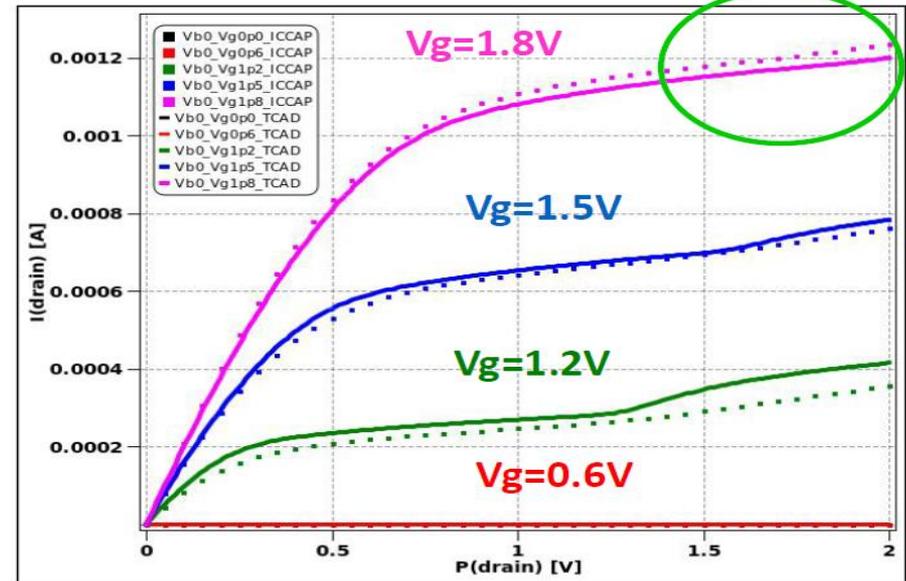
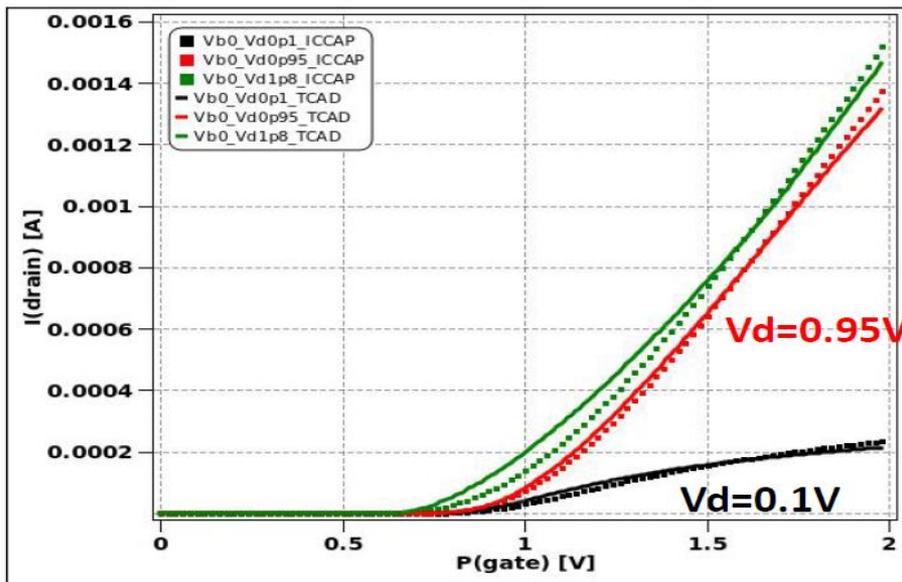
TCAD simulation results vs. experimental results

DSOI NMOS (W/L=8/1)

Solid lines: simulated curves

Dotted lines: experimental curves

Kink effect because of floating body

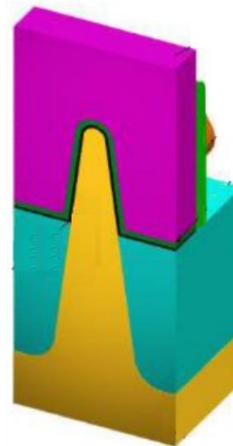
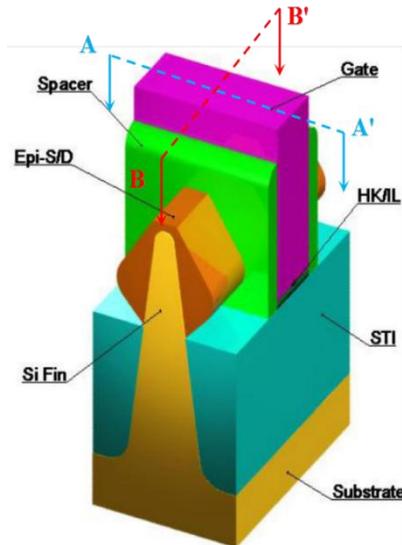


good correspondence!

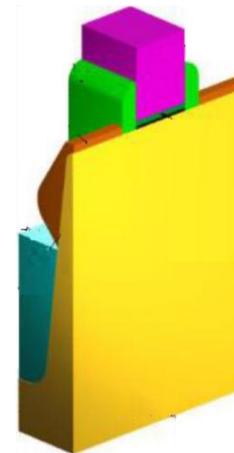
@IMECAS

3D schematic diagram of bulk Si FinFET *

* Microelectronics
Reliability,
Vol. 88–90, September
2018



A-A'



B-B'

Model Parameters

Doping Concentration (/cm³) :

Channel doping : $N_{ch}=2e18$
SD doping: $N_{sd}=2e20$
Channel stop doping : $N_{stop}=2e18$

Doping Type :

nMOS:

Dch: "Boron"
Dsd: "Phosphorus"
Dstop: "Indium"

pMOS

Dch: "Phosphorus"
Dsd: "Boron"
Dstop: "Arsenic"

Geometric Dimension (nm) :

$W_{top}=W_{bottom}=10$ $H_{fin}=35$
 T_{sub} (thickness of substrate)=1000 T_{sti} (thickness of STI oxide)=65nm
 T_{iox} (thickness of IL oxide)=0.6 T_{hfo2} (thickness of HfO₂)=1.7 T_{ox} (total thickness of dielectric oxide)=2.3

W

TiN = 8.6 nm

TiAl = 1.5 nm

TiN = 1 nm

HfO₂ = 2.3 nm

IL = 0.6 nm

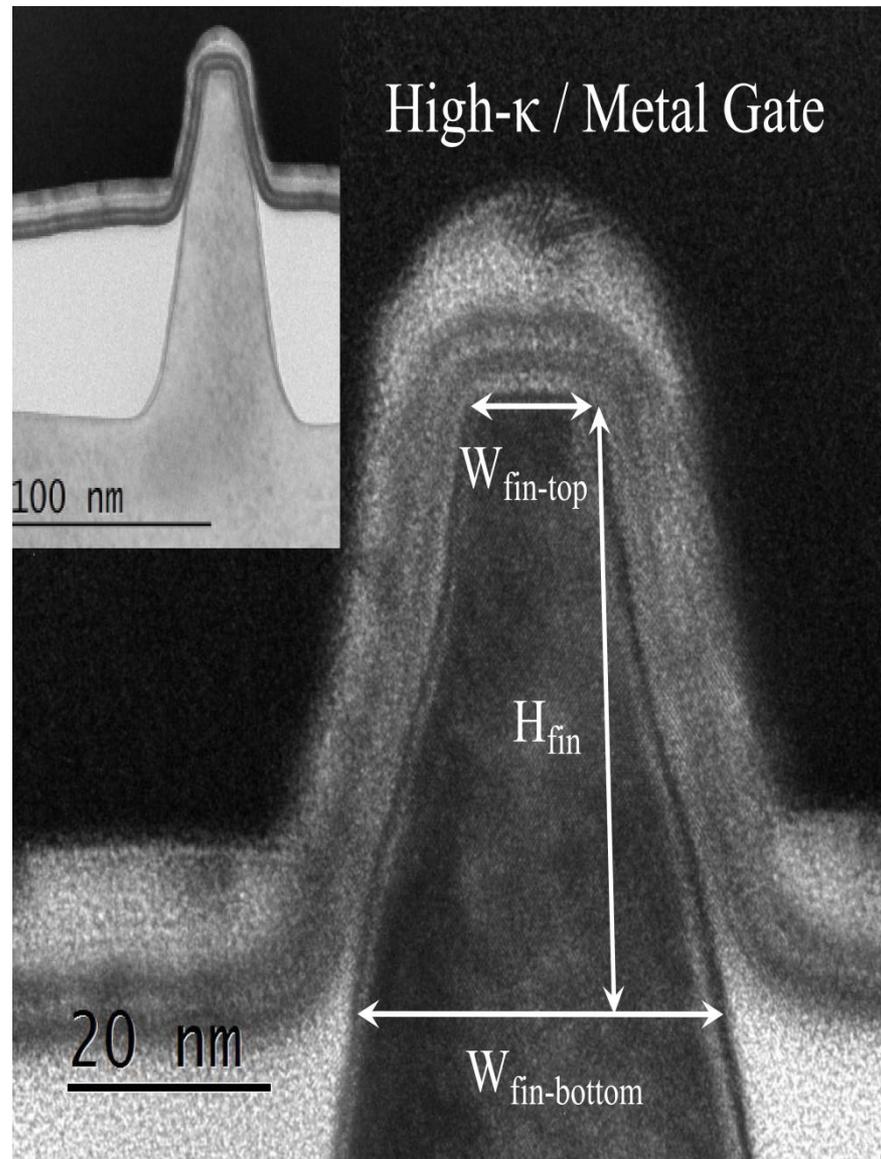
$W_{\text{fin-top}} = 11.72 \text{ nm}$

$W_{\text{fin-bottom}} = 35.42 \text{ nm}$

$H_{\text{fin}} = 44.41 \text{ nm}$

$H_{\text{STI}} = 72 \text{ nm}$

$\theta = 15^\circ$

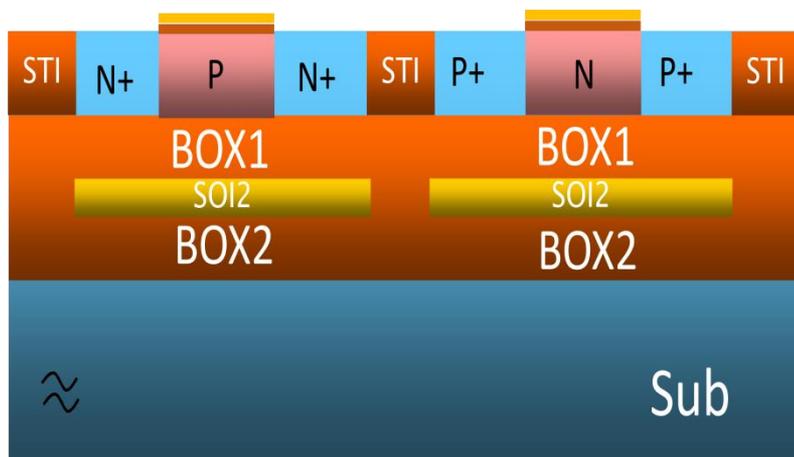


TEM BF (245 kx)

**РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ
В 2020 ГОДУ РОССИЙСКИМ
КОЛЛЕКТИВОМ**

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА SPICE-МОДЕЛИ DSOI МОПТ

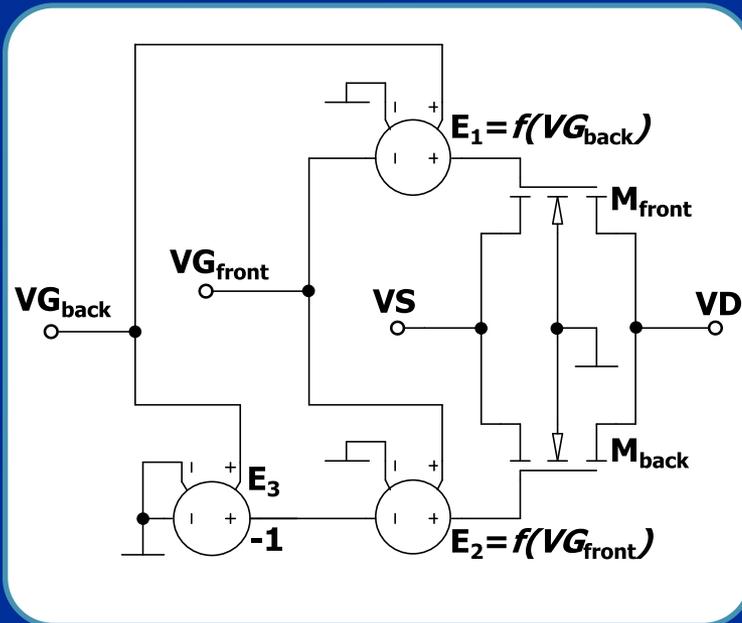
Структура DSOI



Device Structure Parameters	Value (nm)
Gate Oxide Thickness (T_{ox})	4.5
Top Silicon Layer Thickness (T_{SOI1})	50
Buried Oxide Layer 1 Thickness (T_{BOX1})	150
Middle Silicon Layer Thickness (T_{SOI2})	80
Buried Oxide Layer 2 Thickness (T_{BOX2})	150

Эквивалентная схема DSOI

Базовая модель **BSIMSOIv.4.4** для МОПТ M_{FRONT} и M_{BACK}



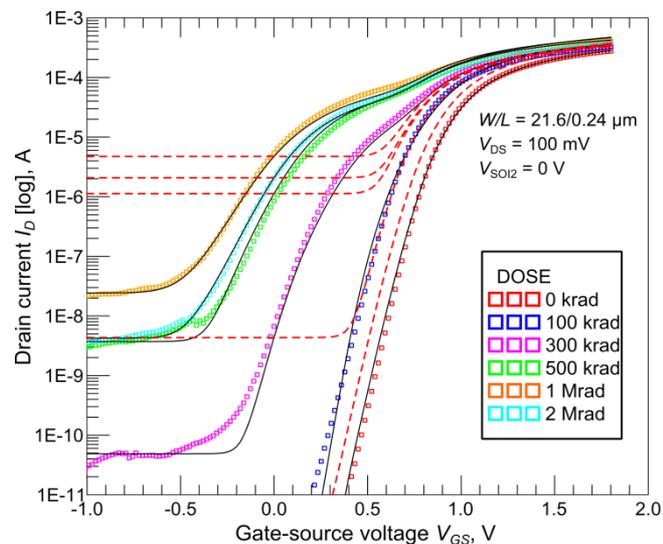
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ВАХ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Прибор: DSOI n-МОПТ с $W/L=21,6 / 0,24$ мкм

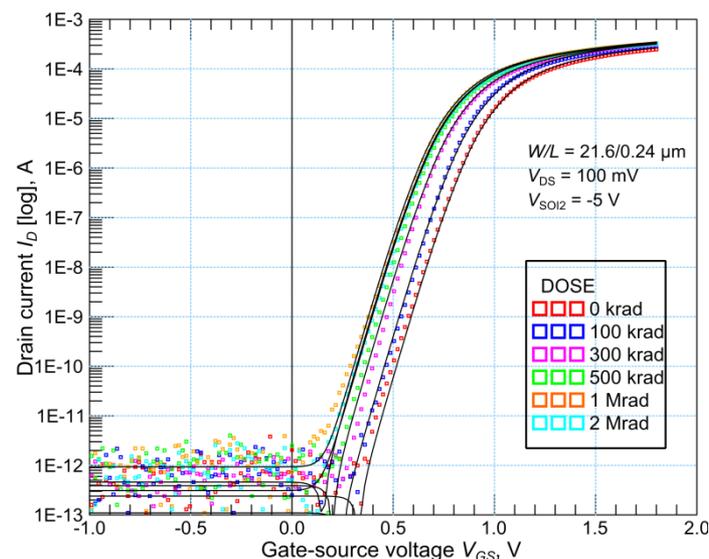
Технология: 0,2-мкм КНИ КМОП

Модель: BSIMSOIv4.4 с радиационно-зависимыми параметрами

При напряжении смещения
 $V_{G_{\text{BACK}}} = 0$ В



При напряжении смещения
 $V_{G_{\text{BACK}}} = -5$ В



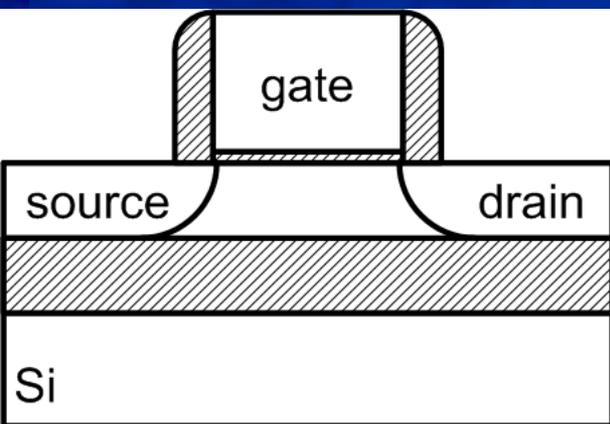
Символы – эксперимент, сплошные линии – моделирование

Пунктирные линии – моделирование без эквивалентной схемы

Погрешность расчета ВАХ в диапазоне Dose=0...2 Mrad <12%

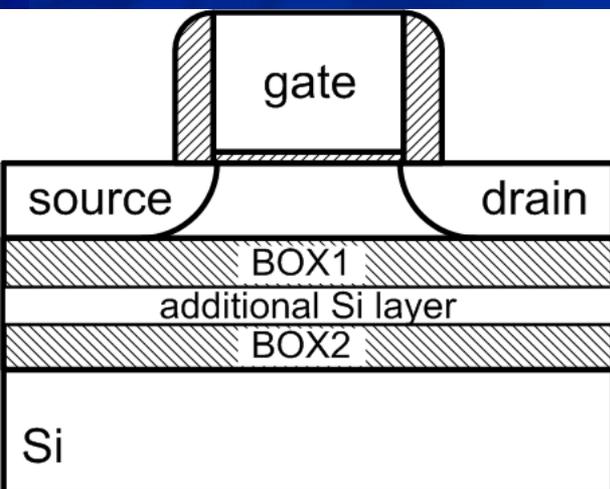
TCAD-SPICE МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОЯЧ НА 4Т ЯЧЕЙКУ SRAM НА СТРУКТУРАХ 0,2 МКМ SOI И DOUBLE-SOI MOSFET

SOI MOSFET



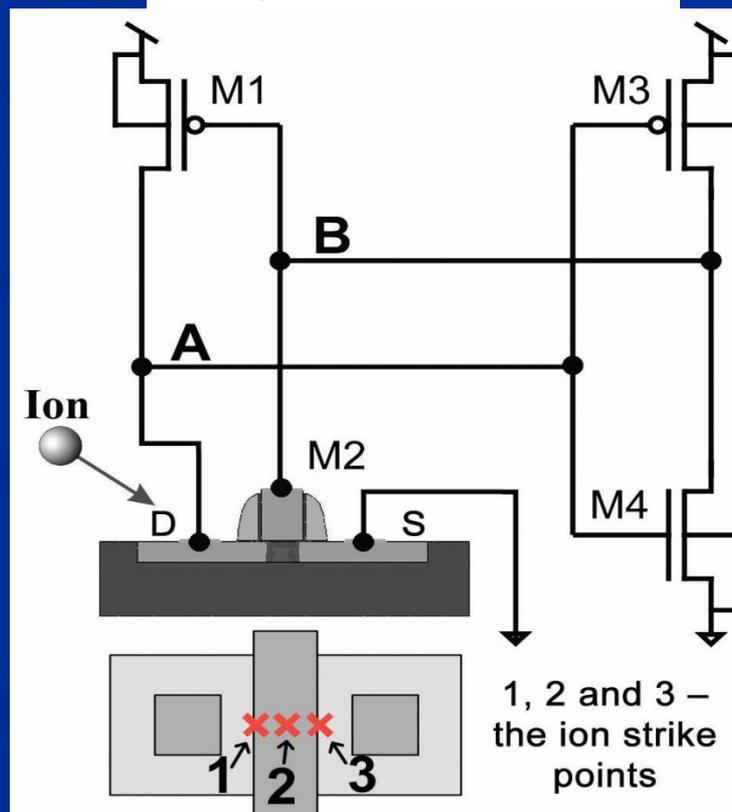
$L=240 \text{ nm}$,
 $t_{\text{Si}}=88\text{nm}$,
 $t_{\text{gatox}}=7\text{nm}$,
 $t_{\text{BOX}}=145\text{nm}$

Double-SOI MOSFET

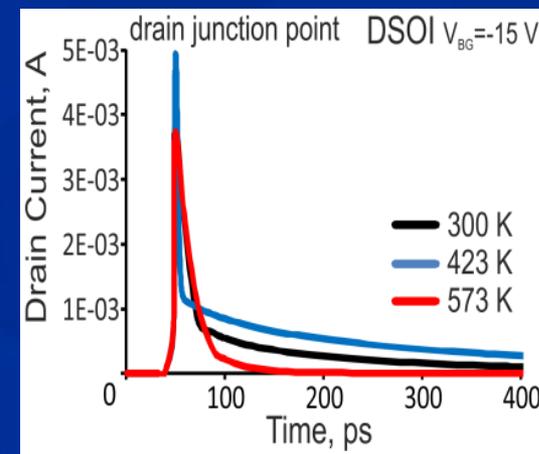
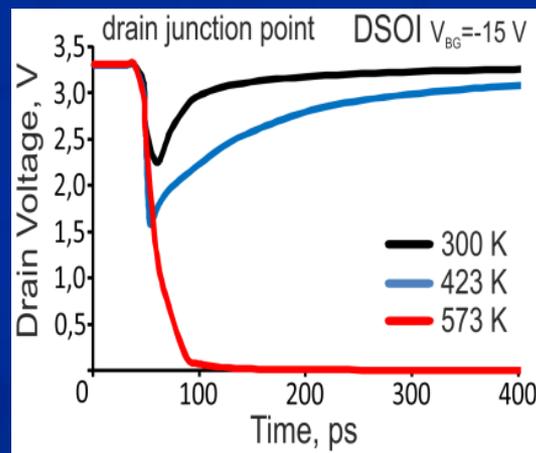
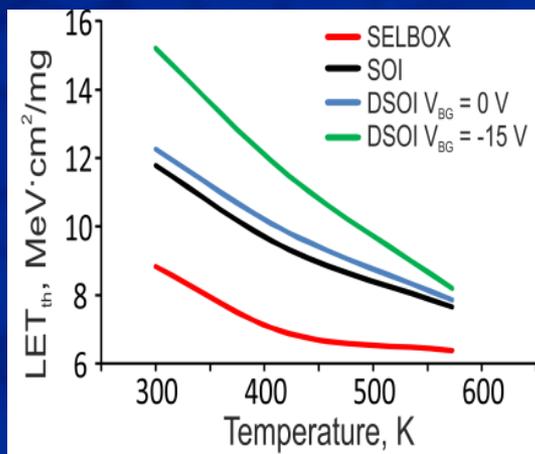


$t_{\text{BOX1}}=70\text{nm}$
 $t_{\text{SOI2}}=77\text{nm}$
 $t_{\text{BOX2}}=75\text{nm}$

Частица Аргона
 $\text{LET} = 10,78 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$
 радиус = 0,02мкм



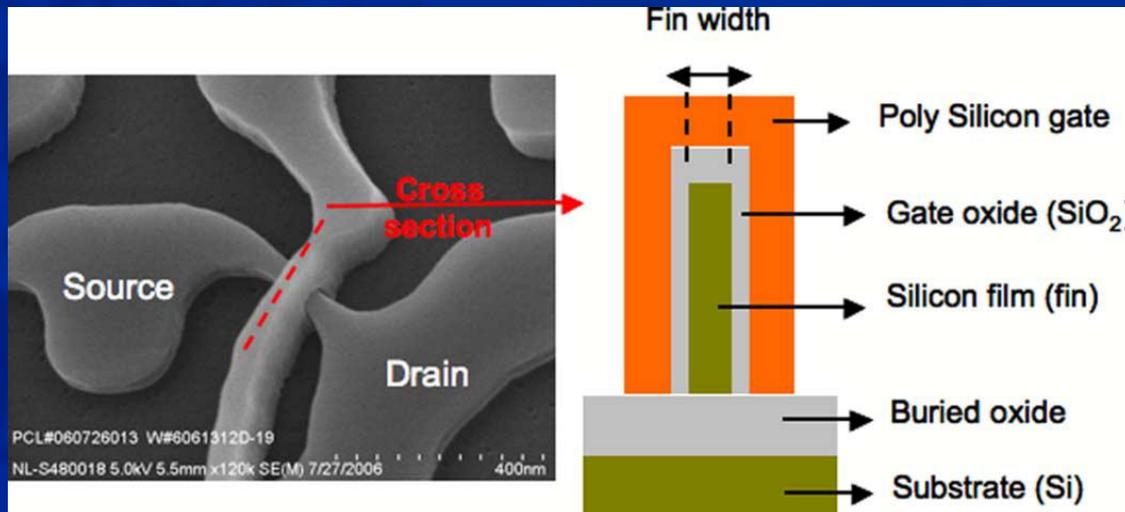
TCAD-SPICE МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОЯЧ НА 4Т ЯЧЕЙКУ SRAM НА СТРУКТУРАХ 0,2 МКМ SOI И DOUBLE-SOI MOSFET



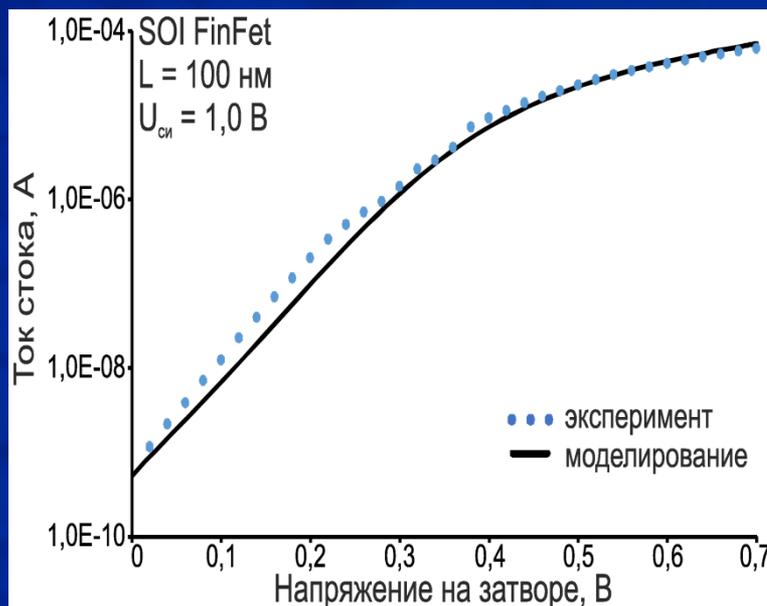
Ячейка SRAM на SOI MOSFET сохраняет логическое состояние до температуры не более 80°C, на DSOI MOSFET до 180°C.

Использование DSOI вместо SOI MOSFET увеличивает радиационную стойкость к воздействию ОЯЧ

TCAD МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК FDSOI 100 НМ FINFET СТРУКТУРЫ*

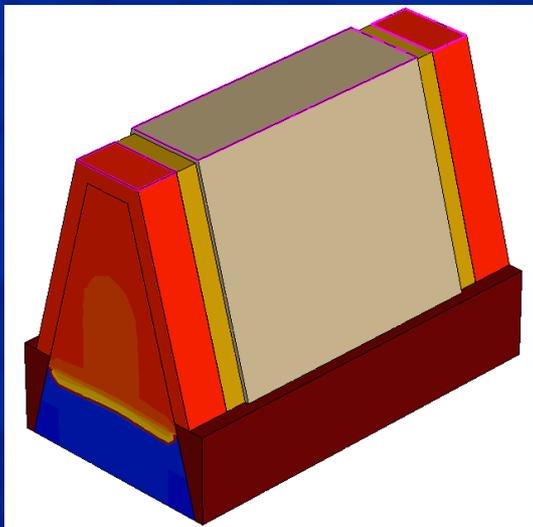


*IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 56, NO. 6, DECEMBER 2009



$L = 100$ нм
 $H_{\text{fin}} = 58$ нм
 $H_{\text{BOX}} = 150$ нм
 $t_{\text{gatox}} = 2$ нм
34 000 элементов сетки

TCAD МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК 60 НМ FINFET СТРУКТУРЫ НА ОБЪЕМНОМ КРЕМНИИ

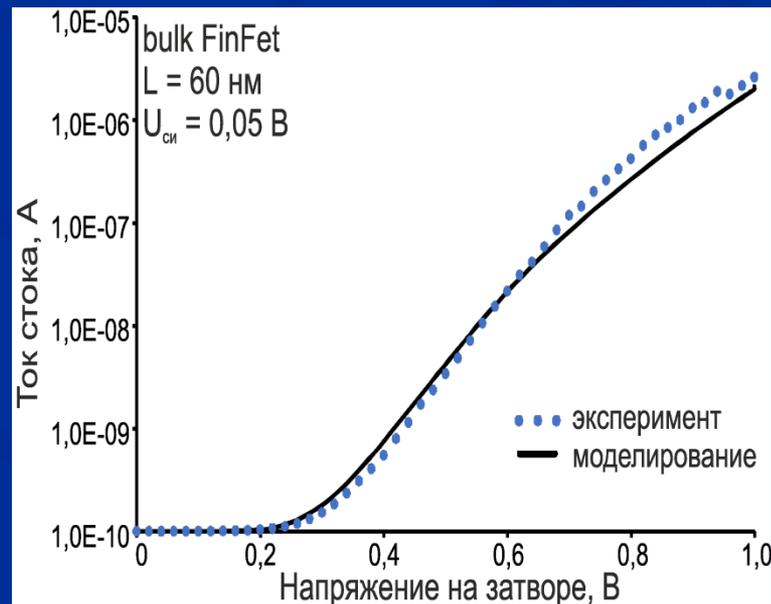
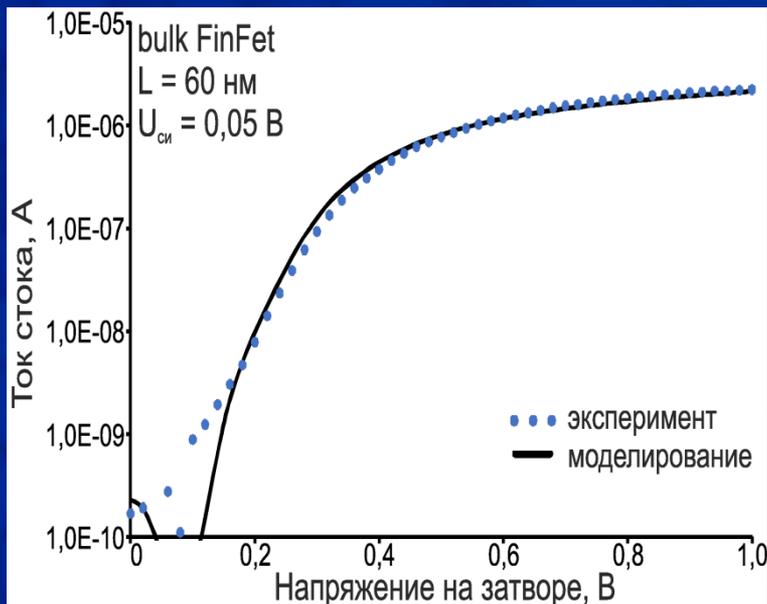


$L = 60$ нм

$H_{\text{fin}} = 44,41$ нм

$t_{\text{gatox}} = 2,9$ нм

67 000 элементов сетки



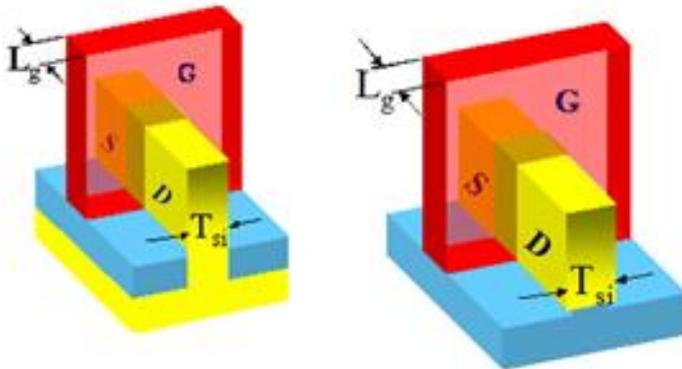
SPICE-МОДЕЛЬ BSIM-CMG ДЛЯ BULK FINFET

Структура FinFET

$L_g = 30$ нм
 $H_{fin} = 35$ нм

$T_{Si} = 10$ нм
 $T_{ox} = 2,3$ нм

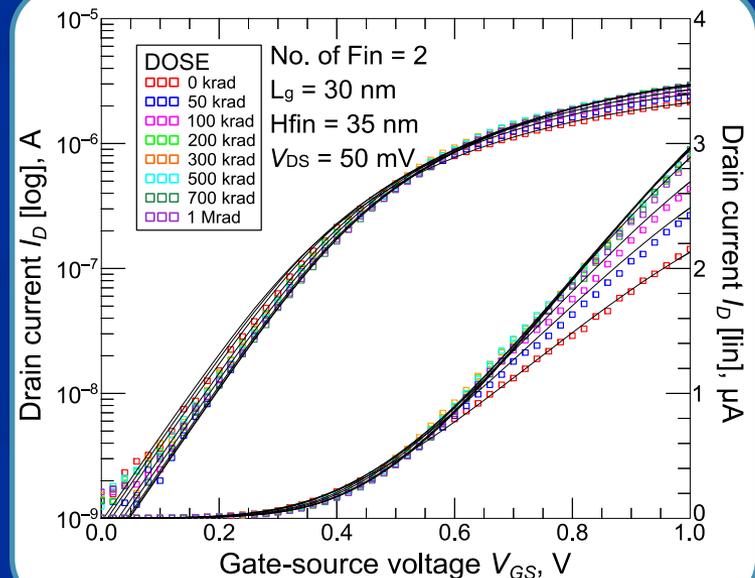
BSIM-CMG



FinFETs on Bulk and SOI Substrates

30-нм Bulk FinFET

Модель **BSIM-CMGv.106** с радиационно-зависимыми параметрами $V_{TH}(T)$, $\mu_{eff}(T)$, $SS(T)$



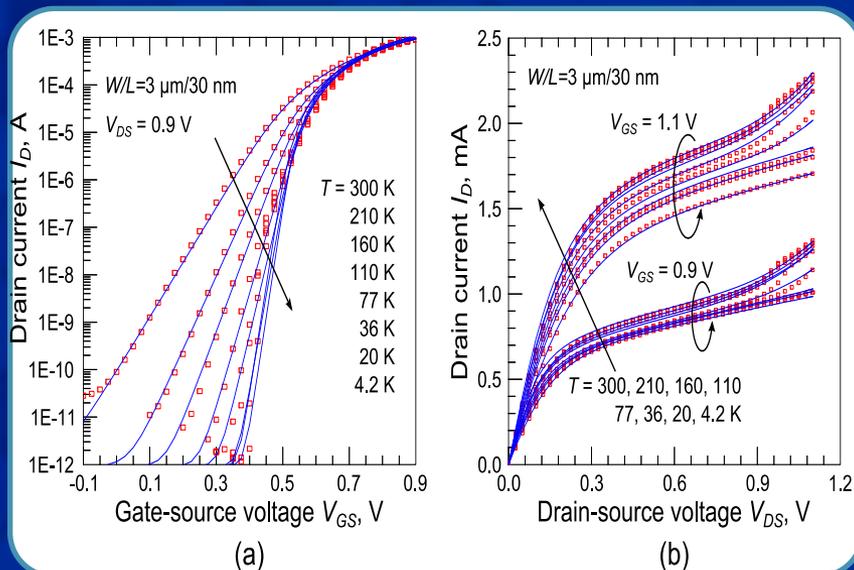
Символы – эксперимент, линии – моделирование

Погрешность расчета ВАХ в диапазоне Dose=0...1 Mrad <12%

SPICE-МОДЕЛИ 28-НМ BULK SI / SOI MOSFET ДЛЯ НОРМАЛЬНЫХ И КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

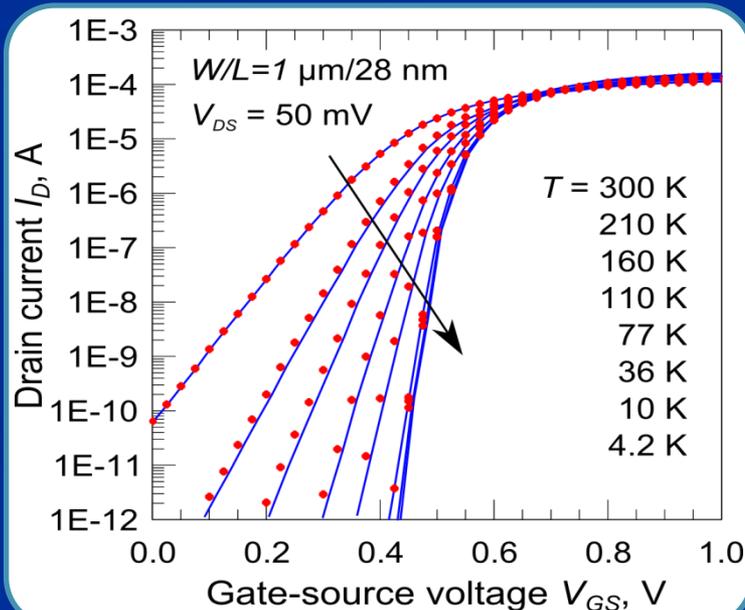
28-нм bulk MOSFET

Модель **PSPv.103.1** с температурно-зависимыми параметрами $V_{TH}(T)$, $\mu_{eff}(T)$, $SS(T)$



28-нм SOI MOSFET

Модель **UTSOIv.2.00** с температурно-зависимыми параметрами $V_{TH}(T)$, $\mu_{eff}(T)$, $SS(T)$



Символы—эксперимент, линии—моделирование

Погрешность расчета ВАХ в диапазоне $T=4 \text{ K} \dots 300 \text{ K} < 12\%$

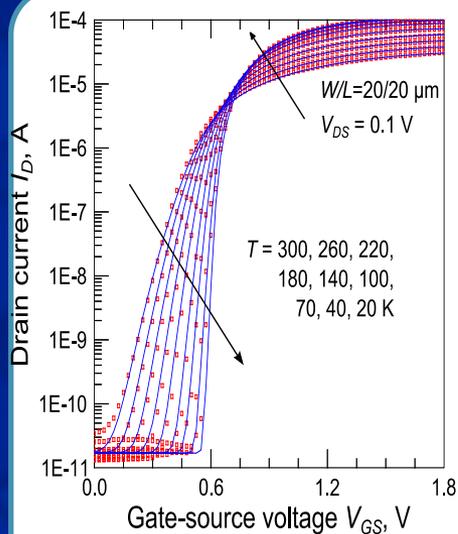
SPICE-МОДЕЛЬ 0,18-МКМ SOI MOSFET ДЛЯ НОРМАЛЬНЫХ И КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

Прибор: КНИ n-МОПТ с $W/L=20/20$ мкм

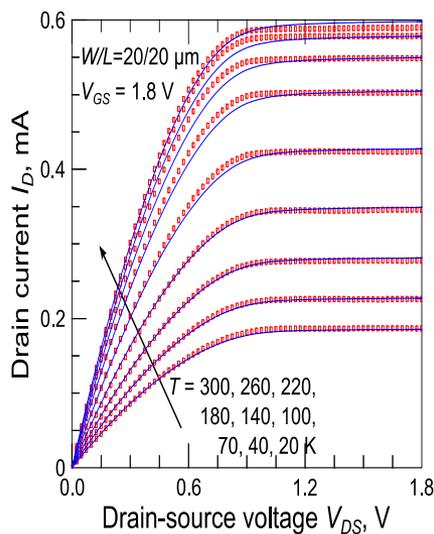
Технология: 0,18-мкм КНИ КМОП

Модель: BSIMSOIv4.4 с температурно-зависимыми параметрами

Электрические характеристики

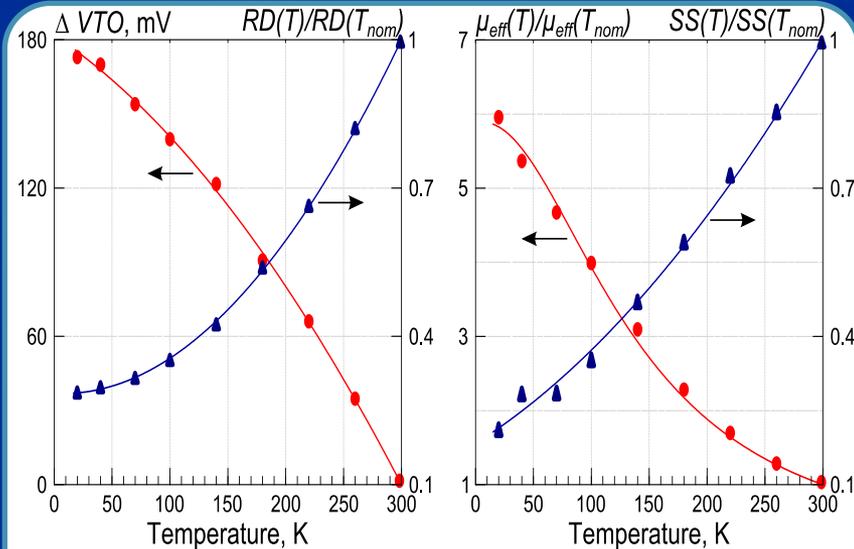


(a)



(b)

Зависимости параметров от температуры



(c)

(d)

Символы—эксперимент, линии—моделирование
Погрешность расчета ВАХ в диапазоне $T=20$ К...300 К $<12\%$

СОВМЕСТНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ В 2020 ГОДУ

В высокорейтинговых журналах:

- K.O. Petrosyants, Bo Li, L. M. Sambursky, M. V. Kozhukhov, M. R. Ismail-zade, I. A. Kharitonov SPICE Compact BJT, MOSFET and JFET Models for ICs Simulation in the Wide Temperature Range (from -200°C to +300°C // IEEE Tran. On Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2020

Участие китайских партнеров в научных конференциях, проводимых российской стороной:

1. **Bo Li** Double-gate SOI (DSOI): a promising candidate for high reliable microelectronics (пленарный доклад) // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), March 2020, Moscow.
2. K. O. Petrosyants, D. A. Popov, M. R. Ismail-Zade, L. M. Sambursky, **Bo Li, Y. C. Wang** TCAD and SPICE Models for Account of Radiation Effects in Nanoscale MOSFET Structures // Труды МЭС-2020.

СОВМЕСТНОЕ УЧАСТИЕ В МЕЖДУНАРОДНЫХ НАУЧНЫХ КОНФЕРЕНЦИЯХ

1. THERMINIC 2020 (Sept., Berlin)

M. R. Ismail-zade, K. O. Petrosyants, L. M. Sambursky, X. Zhang, B. Li, J. Luo and Z. Han SPICE Modeling of Small-Size Bulk, SOI and SOS MOSFETs at Deep Cryogenic Temperatures

2. MicDAT 2020 (Oct., Tenerife, Spain)

K. O. Petrosyants, D. A. Popov, B. Li, Y. Wang TCAD-SPICE Investigation of SEU Sensitivity for SOI and DSOI CMOS SRAM Cells in Temperature Range up to 300°C

3. RADECS 2020

Y. Wang, F. Liu, Bo Li, K. O. Petrosyants et al. Dependency of Temperature and Back-gate Bias on Single Event Upset Induced by Heavy Ion in a 0.2 μm DSOI CMOS Technology

4. RADECS 2020

X. Zhang, F. Liu, Bo Li, K. O. Petrosyants et al. A two-dimensional electrostatic potential model for total dose ionization effects in FOI FinFETs

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ИТОГАМ РАБОТЫ ПО ПРОЕКТУ В 2020 Г.

1. Отработаны механизмы On-line взаимодействия между сторонами-исполнителями проекта;
2. Определены типы приборов для исследования (device under test – DUT): 28 нм FD SOI MOSFETs, 28 нм FinFet, Double-SOI MOSFET и др.;
3. Отработаны методики моделирования и экстракции параметров суб-мкм и нм-MOSFETs с помощью SPICE-моделей BSIMSOIv.4.4, PSPv.103.1, UTSOIv.2.00 и нм-FinFET с помощью BSIM-CMG.
4. Отработаны методики TCAD-моделирования суб-мкм и нм-MOSFET-ов без учета влияния радиации и температуры;
5. Опубликовано совместных статей в высокорейтинговых журналах – 1;
подано статей для публикации в журналах – 3;
сделано докладов на конференциях с регистрацией трудов в системе Scopus – 6.

ПЛАНЫ НА 2021 ГОД

1. Настройка и верификация SPICE и TCAD моделей 28нм МОПТ на объемном кремнии и КНИ структурах при воздействии γ -лучей и ОЯЧ.
2. Построение SPICE моделей для 30нм FinFET необлученных и при воздействии γ -лучей.
3. Построение TCAD моделей для 3D структур FinFET с учетом воздействия гамма лучей.

Спасибо за внимание!

