

УДК 621.382

## **Физико-топологическая модель полевого транзистора, учитывающая деградацию эксплуатационных характеристик при влиянии ионизирующего излучения**

Ловшенко И. Ю., Стемпицкий В. Р., Шандарович В. Т.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Республика Беларусь  
lovshenko@bsuir.by*

Получено: 11 ноября 2019 г.

Отрецензировано: 13 декабря 2019 г.

Принято к публикации: 16 декабря 2019 г.

**Аннотация:** *Представлены результаты применения разработанной и интегрированной в программный продукт компании Cadence компактной модели МОП-транзистора для оценки радиационной стойкости схемы токового зеркала и 6T SRAM со схемой управления чтением/записью при совместном или раздельном воздействии рентгеновского и нуклидного  $^{60}\text{Co}$  источников ионизирующего излучения.*

**Ключевые слова:** *радиационная стойкость, ионизирующее излучение, приборно-технологическое моделирование, САПР, SPICE, модель, полевой транзистор, Verilog-A, токовое зеркало, 6T SRAM.*

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):** Ловшенко И. Ю., Стемпицкий В. Р., Шандарович В. Т. Физико-топологическая модель полевого транзистора, учитывающая деградацию эксплуатационных характеристик при влиянии ионизирующего излучения // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2019. Т. 2, № 4. С. 466—475.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011):** Ловшенко, И. Ю. Физико-топологическая модель полевого транзистора, учитывающая деградацию эксплуатационных характеристик при влиянии ионизирующего излучения / И. Ю. Ловшенко, В. Р. Стемпицкий, В. Т. Шандарович // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2019. — Т. 2, № 4. — С. 466—475.

# Physic-topological model of a field effect transistor, taking into account the degradation of operational characteristics under the influence of ionizing radiation

I. Yu. Lovshenko, V. R. Stempitsky, and V. T. Shandarovich  
*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*  
6, P. Brovki Str., Minsk, 220013, Belarus  
lovshenko@bsuir.by

Received: November 11, 2019

Peer-reviewed: December 13, 2019

Accepted: December 16, 2019

**Abstract:** *The results of the application compact MOSFET model developed and integrated into the Cadence software product for assessing hardness of the circuit of current mirror and 6T SRAM with the read / write control circuit when combined or separately exposed to x-ray and nuclide  $^{60}\text{Co}$  ionizing radiation sources are presented.*

**Keywords:** *hardness, ionizing radiation, process and device simulation, CAD, SPICE, model, field-effect transistor, Verilog-A, current mirror, 6T SRAM.*

**For citation (IEEE):** I. Yu. Lovshenko et al. “Physic-topological model of a field effect transistor, taking into account the degradation of operational characteristics under the influence of ionizing radiation,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 2, no. 4, pp. 466—475, 2019. (In Russ.).

## 1. Введение

В основе методов оценки и прогнозирования радиационной стойкости интегральных микросхем (ИМС) лежат исследования механизмов возникновения радиационных эффектов в твердом теле. Воздействие проникающей радиации проявляется в радиационных эффектах в полупроводниках и структурах с  $p$ - $n$ -переходами: эффекты смещений, ядерные превращения, ионизационные эффекты [1—3]. Ядерные превращения в данной работе рассматриваться не будут. Эффекты смещений приводят к образованию в кристалле радиационных дефектов. Радиационный дефект может возникнуть в том случае, если энергия бомбардирующей частицы достаточна для смещения атома из узла кристаллической решетки в междоузлие. Влияние ионизационных эффектов (полной поглощенной дозы ионизирующего излучения) на электрические свойства полупроводниковых элемен-

тов и ИМС схем носит сложный характер и сильно изменилось за десятилетия развития приборных структур и технологий микроэлектроники [4].

Наибольшее влияние на эксплуатационные характеристики МОП-транзистора оказывают ионизационные эффекты, которые проявляются в изменении свойств подзатворного и изолирующего диэлектрика. Так, воздействие ионизирующего излучения вызывает генерацию пар электрон — дырка (при этом дырки захватываются ловушками в диэлектриках), а также приводит к формированию ловушек на границе раздела диэлектрик — полупроводник (т. е. поверхностных состояний) [5]. Захваченные в диэлектрике дырки вызывают отрицательным сдвиг порогового напряжения как для  $n$ -канальных, так и для  $p$ -канальных транзисторов. Новые состояния интерфейса проявляются в виде ухудшения крутизны и подпорогового наклона, а также приводят к возникновению смещения порогового напряжения, которое является положительным для  $n$ -канальных транзисторов и отрицательным для  $p$ -канала. Положение захваченных дырок определяет величину этого сдвига. Если вклад в смещение порогового напряжения из-за новых состояний интерфейса выше (по абсолютной величине), чем вклад из-за захваченных дырок, то пороговое смещение для  $n$ -канального транзистора будет положительным, и, следовательно, подпороговый ток не увеличиваться. Однако в зависимости от используемой изоляции (LOCOS или STI) могут образовываться паразитные токи утечки между истоком и стоком.

## 2. Компактная модель

Разработанная модель представляет собой реализацию на языке описания аппаратуры Verilog-A выражений стандартизированной модели BSIM4 [6] с дополнительным блоком определения поправочных коэффициентов параметров модели наиболее подверженных изменениям при воздействии ионизирующего излучения ( $UA$ ,  $UB$ ,  $VTH0$ ,  $K1$ ,  $LINT$ ). Такой блок реализован для двух источников излучения: рентгеновского и нуклидного  $^{60}Co$ , что позволяет оценивать, как раздельное, так и совместное влияние этих источников как суперпозицию вносимого в подзатворный диэлектрик заряда. Для учета влияния воздействия ионизирующего излучения (ИИ) на электрические характеристики транзистора в модель введены дополнительные группы переменных:

— суперпозиция влияния ИИ на параметр модели:  $rUA$ ,  $rUB$ ,  $rVTH0$ ,  $rK1$ ,  $rLINT$ ;

— коэффициент изменения параметра, зависящий от величины полной поглощенной дозы для рентгеновского и нуклидного  $^{60}Co$  источников

ИИ:  $k1\_xray\_UA$ ,  $k1\_xray\_UB$ ,  $k1\_xray\_VTH0$ ,  $k1\_xray\_K1$ ,  $k1\_xray\_LINT$ ,  
 $k1\_co60\_UA$ ,  $k1\_co60\_UB$ ,  $k1\_co60\_VTH0$ ,  $k1\_co60\_K1$ ,  $k1\_co60\_LINT$ ;

— коэффициент изменения параметра, зависящий от величины мощности ионизирующего излучения для рентгеновского и нуклидного  $^{60}Co$  источников:  $k2\_xray\_UA$ ,  $k2\_xray\_UB$ ,  $k2\_xray\_VTH0$ ,  $k2\_xray\_K1$ ,  $k2\_xray\_LINT$ ,  $k2\_co60\_UA$ ,  $k2\_co60\_UB$ ,  $k2\_co60\_VTH0$ ,  $k2\_co60\_K1$ ,  $k2\_co60\_LINT$ ;

— коэффициент изменения параметра, зависящий от значения длины канала транзистора для рентгеновского и нуклидного  $^{60}Co$  источников ИИ:  $k3\_xray\_UA$ ,  $k3\_xray\_UB$ ,  $k3\_xray\_VTH0$ ,  $k3\_xray\_K1$ ,  $k3\_xray\_LINT$ ,  $k3\_co60\_UA$ ,  $k3\_co60\_UB$ ,  $k3\_co60\_VTH0$ ,  $k3\_co60\_K1$ ,  $k3\_co60\_LINT$ ;

— коэффициент изменения параметра, зависящий от значения ширины канала транзистора для рентгеновского и нуклидного  $^{60}Co$  источников ИИ:  $k4\_xray\_UA$ ,  $k4\_xray\_UB$ ,  $k4\_xray\_VTH0$ ,  $k4\_xray\_K1$ ,  $k4\_xray\_LINT$ ,  $k4\_co60\_UA$ ,  $k4\_co60\_UB$ ,  $k4\_co60\_VTH0$ ,  $k4\_co60\_K1$ ,  $k4\_co60\_LINT$ .

Коэффициенты изменения параметров рассчитываются по аппроксимационным зависимостям, получаемым при анализе результатов экстракции параметров модели для приборных структур, подверженным влиянию ионизирующего излучения (в результате натурального или компьютерного эксперимента).

Для указания внешних воздействующих факторов в модели применяются соответствующие параметры:

— для задания источника излучения  $CO60$  и  $XRAY$  (могут принимать значение Истина (1) или Ложь (0) независимо друг от друга);

— для указания величины полной поглощенной дозы  $DOSE\_CO60$  и  $DOSE\_XRAY$  для нуклидного и рентгеновского источника соответственно (значение в рад);

— для указания мощности ионизирующего излучения  $POWER\_CO60$  и  $POWER\_XRAY$  для нуклидного и рентгеновского источника соответственно (значение в рад/с).

Для получения значений параметров модели BSIM4 проведена процедура экстракции SPICE-параметров с применением локальной оптимизации, основанная на физическом понимании модели. ВAX, полученные с использованием экстрагированных значений параметров модели BSIM4, соответствуют результатам приборно-технологического моделирования.

### 3. Результаты

Посредством использования разработанной модели МОП-транзистора проведено исследование влияния параметров рентгеновского

и нуклидного  $^{60}\text{Co}$  источников ИИ на электрические характеристики аналоговой и цифровой схемы: токового зеркала и шеститранзисторной ячейки статической памяти с произвольным доступом (6T SRAM, static random access memory) со схемой управления чтением/записью соответственно.

Токовое зеркало — генератор тока, управляемый током. Простое токовое зеркало (рис. 1) содержит два одинаковых транзистора, входной  $T1$  и выходной  $T2$ , соединенных затворами. Основными параметрами токового зеркала являются: выходной ток (и коэффициент трансформации тока), выходное сопротивление, диапазон работы (допустимое выходное напряжение).

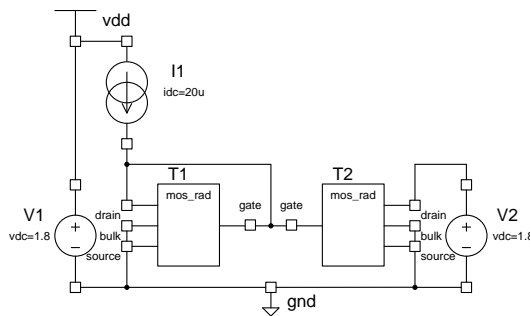


Рис. 1. Скомпонованная схема токового зеркала.

Fig. 1. The assembly circuit of the current mirror

При предварительном моделировании из возможного диапазона применения параметров модели установлены значения длины и ширины канала транзисторов, обеспечивающие наилучшие электрические характеристики:  $L = 2$  мкм,  $W = 1,5$  мкм. Напряжение питания для схемы составляет 1,8 В, величина тока источника тока — 20 мкА. Проведен DC-анализ для схемы, работающей в нормальных условиях и при воздействии ИИ рентгеновского источника (рис. 2). Анализ результатов моделирования показал, что увеличение полной поглощенной дозы  $TID$  ИИ приводит к повышению величины выходного тока и снижению выходного дифференциального сопротивления, а, значит, снижаются эксплуатационные характеристики токового зеркала. Однако величина изменения характеристик не превышает 4 % (при  $TID = 1,5$  Мрад).

Максимально широкий диапазон работы токового зеркала необходим, так как оно используется в качестве линейного источника тока для дифференциальных пар и линейных усилителей. Следовательно, чем больше диапазон линейности источника, тем меньше вероятность появления дополнительных гармоник. Посредством моделирования определен

максимальный диапазон работы токового зеркала при вариации значений величин полной поглощенной дозы и мощности рентгеновского источника ИИ. Максимальный диапазон работы токового зеркала в нормальных условиях составляет 1,3335 В. При воздействии полной поглощенной дозы ионизирующего излучения рентгеновского источника  $TID = 0,5$  Мрад (мощность 0,1 рад/с) величина максимального диапазона работы снижается на 0,26 % (до значения 1,33 В). При увеличении дозы до 1 Мрад диапазон уменьшается еще на 0,11 % (1,3285 В), при 1,5 Мрад — на 0,07 % (1,3275 В). Повышение мощности ионизирующего излучения также приводит к уменьшению максимального диапазона работы. Так при  $TID = 1,5$  Мрад и мощности 1 рад/с диапазон работы уменьшается до значения 1,323 В (на 3,39 %), а при 10 рад/с — до значения 1,312 В (на 8,31 %).

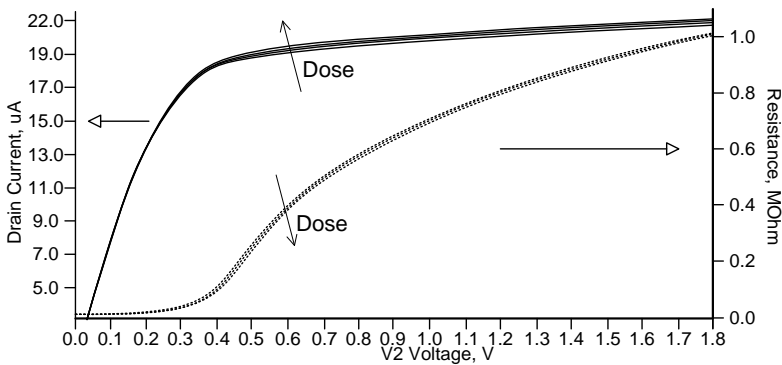


Рис. 2. Зависимости выходного тока и сопротивления токового зеркала от напряжения питания при вариации полной поглощенной дозы ИИ рентгеновского источника мощностью 0,1 рад/с.

Fig. 2. Dependences of the output current and resistance of current mirror on supply voltage when varying the total absorbed dose ionizing radiation of X-ray source with a power of 0,1 rad/s

Ячейка SRAM состоит из триггера, на выводах которого хранятся логические данные «0» или «1». Чаще всего используемая ячейка SRAM представляет собой 6-транзисторную (6Т) КМОП ячейку памяти, представленную на рис. 3. Такая ячейка состоит из двух инверторов [МОП-транзистор LD0 с драйвером нагрузки DR0, LD1-DR1] и двух МОП-транзисторов доступа (AC0, AC1), которые подключены к паре битовых линий ВТ, ВВ, а также к линии управления транзисторами доступа WL. Для формирования триггера вход и выход одного инвертора соединены с выходом и входом другого инвертора соответственно.

Базовая полная структура массива ячеек памяти также включает в себя декодер слова, который выбирает один WL на основе адресов (A),

схему управления колонками, которая объединяет драйверы управления чтением/записью. Такие драйвера состоят из схемы подзарядки, колонного мультиплексора (mux), усилителя считывания (SA), выхода FF и усилителя записи (WA).

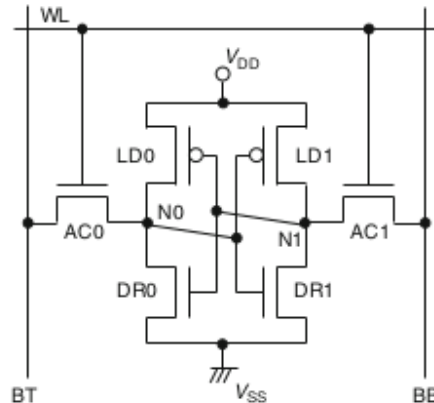


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная ячейки 6T SRAM

Fig. 3. 6T SRAM cell electrical schematic diagram

Операция записи начинается с активации выбранной строки слова. Перед активацией битовые линии выравниваются примерно до VDD. Напряжение записи данных, чей логический уровень соответствует данным записи на входе данных (DIN), подается на разрядные линии усилителем записи (WA). Переключатель столбцов включается сигналом выбора столбца для записи (YSW). Напряжения записи данных передаются в битовые строки. Затем напряжения узла ячейки (N1, N0) изменяются. Операция записи завершается отключением строки слова. Операция чтения начинается с активации выбора строки слова. Перед активацией цепь предварительной зарядки выравнивает и повышает напряжение разрядной линии до уровня VDD. Каждая ячейка генерирует небольшое напряжение сигнала,  $\Delta VS$ , на одной из битовых линий в зависимости от сохраненных данных ячейки. Если сохраненные данные равны «1», где узел N0 ячейки находится под низким напряжением, а узел N1 ячейки находится под высоким напряжением, напряжение BT уменьшается на  $\Delta VS$ . Другая битовая линия (BB) остается на выровненном напряжении, потому что транзистор доступа (DR1) не включен. Дифференциальные сигналы передаются в пару входных сигналов датчиков (ST/SB) путем включения выбранного переключателя колонки. Описанный выше принцип работы подтверждается данными моделирования схемы в отсутствие воздействия ИИ (рис. 4).

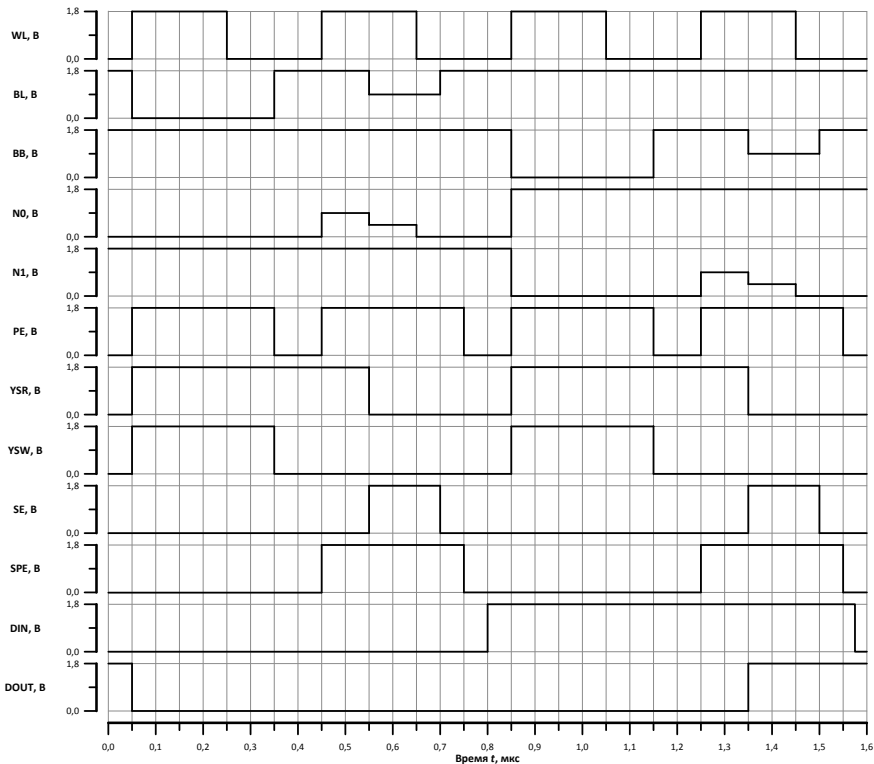


Рис. 4. Временная диаграмма записи и чтения данных 6Т SRAM в нормальных условиях.

Fig. 4. Timing chart for writing and reading 6T SRAM data under normal conditions

Проведено исследование влияния полной поглощенной дозы и мощности ИИ рентгеновского и нуклидного  $^{60}\text{Co}$  источников на работоспособность схемы. При этом входные сигналы принимались неизменными.

Установлено, что нуклидный источник с мощностью  $P = 0,1$  рад/с оказывает малое воздействие на работоспособность схемы вплоть до значений  $TID = 1,5$  Mrad. При увеличении мощности источника до 1 рад/с наблюдаются значительные нарушения в работе ячейки памяти при  $TID = 1.5$  Mrad, которые выражаются в увеличении напряжения логического нуля на выходе схемы DOUT (до значения 300 мВ), а также изменении в состоянии узлов ячейки N1 и N0 при пропадании управляющего сигнала WL. Однако при этом запись и чтении из ячейки происходит корректно. Стоит отметить симметричность влияния ИИ на чтение/запись логических нуля и единицы. Установлено, что рентгеновский источник оказывает меньшее влияние на электрические характеристики ячейки памяти



6Т SRAM в диапазоне мощностей излучения от 0,1 до 10 рад/с и полной поглощенной дозы до 1,5 Мрад.

Проведено моделирование электрических характеристик ячейки памяти 6Т SRAM, подверженной совместному влиянию рентгеновского и нуклидного  $^{60}\text{Co}$  источников ионизирующего излучения ( $P = 0,1$  рад/с). При общей поглощенной дозе 1 Мрад (по 500 крад от каждого источника) наблюдается только изменение состояний битовых линий аналогично рассмотренному ранее случаю. При увеличении общей поглощенной дозы до 2 Мрад и выше происходит изменение состояния узлов ячейки N1 и N0 в момент времени, который соответствует операции чтения данных записанных в ячейку (сигнал YSR принимает значение логического нуля). Кроме того, состояние выхода DOUT остается неизменным независимо от данных, записанных в ячейку, и соответствует высокому уровню. Таким образом, можно сделать вывод о неработоспособном состоянии выходного триггера при значении полной поглощенной дозы более 2 Мрад.

#### 4. Заключение

Проведена интеграция в программный продукт компании Cadence компактной модели МОП-транзистора, реализованной на языке описания аппаратуры Verilog-A, которая позволяют учитывать при схемотехническом моделировании влияние топологических размеров затвора (допустимое значение ширины от 1,5 мкм до 6,0 мкм, длины — от 1 мкм до 2 мкм), температуры окружающей среды (от 223 К до 373 К), мощности (от 0,1 рад/с до 10 рад/с), дозы (от 0 до 1,5 Мрад) и типа источника ( $^{60}\text{Co}$  или Xгау-источник) ионизирующего излучения.

#### 5. Благодарности

Исследования выполняются при финансовой поддержке и в рамках решения задач государственной программы научных исследований «Фотоника, опто- и микроэлектроника» (задание 3.1.03).

#### Список литературы

1. Динс Д. Радиационные эффекты в твердых телах. М. : Изд-во иностранной литературы, 1960. 243 с.
2. Starchenko E. I. Features of the circuitry of operational amplifiers hardened to neutrons flux effects. In : Microprocessing Analog and Digital systems : Design and Circuit Engineering, Theory and Applications: Third International Scientific and Practical Conference (Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, 2003). 2003. P. 19—23.

3. Baumann R., Kruckmeyer K. Radiation handbook for electronics : A compendium of radiation effects topics for space, industrial and terrestrial applications. Dallas : TI, 2019. 117 p.
4. Hughes H., Benedetto J. Radiation effects and hardening of MOS technology : devices and circuits // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2003. 50 (3). P. 500—521.
5. Кузнецов Н. В. Радиационная опасность на околоземных орбитах и межпланетных траекториях космических аппаратов. М. : НИИЯФ МГУ. 2006. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://nuclphys.sinp.msu.ru/crd> (дата обращения: 09.01.2020).
6. Chauhan Y. S., Niknejad Ali M., Hu C. BSIM4 4.8.1 MOSFET Model. Berkeley : University of California, 2017. 177 p.

### Информация об авторах

**Ловшенко Иван Юрьевич**, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Компьютерное проектирование микро- и нанoeлектронных систем» (НИЛ 4.4) научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР), г. Минск, Республика Беларусь.

**Стемпницкий Виктор Романович**, канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника научно-исследовательской части, научный руководитель научно-исследовательской лаборатории «Компьютерное проектирование микро- и нанoeлектронных систем» (НИЛ 4.4) научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР), г. Минск, Республика Беларусь.

**Шандарович Вероника Томашевна**, аспирант кафедры микро- и нанoeлектроники, мл. науч. сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Компьютерное проектирование микро- и нанoeлектронных систем» (НИЛ 4.4) научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР), г. Минск, Республика Беларусь.

### Information about the authors

**Ivan Yu. Lovshenko**, Head of the Research Laboratory “Computer Projection of Micro- and Nanoelectronic Systems” (Research Laboratory 4.4) of the research department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR), Minsk, Republic of Belarus.

**Victor R. Stempitsky**, Ph.D., Associate Professor, Deputy Head of Research and Development Department Sc. Adviser of “CAD in Micro- and Nanoelectronics” (Research Laboratory 4.4) Laboratory Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR), Minsk, Republic of Belarus.

**Veronika T. Shandarovich**, postgraduate student of micro- and nanoelectronics department, researcher of Research Laboratory 4.4 R&D department of BSUIR, Minsk, Republic of Belarus.