

DOI: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-51-59

УДК 621.382.223

**А. А. Даниленко, А. В. Стрыгин, Н. И. Михайлов, В. В. Перепеловский***Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)  
ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия***Я. Н. Паничев***ПАО "Морион"  
просп. КИМа, 13А, Санкт-Петербург, 199155, Россия***В. В. Марочкин***Pixpolar Oy  
10, Metallimiehenkuja, c/o Regus Kora, 02150, Espoo, Finland***В. Л. Иванов***Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики  
ул. Ломоносова, д. 9, Санкт-Петербург, 191002, Россия*

## ПРОГРАММИРОВАНИЕ ДВУХБИТНОГО PIN-ДИОДА В СРЕДЕ SYNOPSIS SENTAURUS TCAD

**Аннотация.** Статья посвящена моделированию двухбитного pin-диода. Показана возможность программирования времени открытия устройства на основе pin-диода. Рассмотрена конструкция, состоящая из pin-диода и двух плавающих затворов на поверхности *i*-области. Добавление электродов на поверхность *i*-области дает возможность регулировать концентрацию электронов и дырок в больших пределах в сравнении с однозатворной структурой, создавая обогащенные и обедненные области в структуре. Программирование осуществляется подачей соответствующего напряжения на управляющие электроды плавающих затворов. Показано, что создаваемый на плавающем затворе заряд изменяет характеристики *i*-области pin-диода.

Важными элементами комплексного моделирования двухзатворного pin-диода являются моделирование механизма накопления заряда на плавающих затворах, моделирование времени открытия pin-диода, калибровка численной модели. Моделирование выполнено в среде Synopsys Sentaurus TCAD. При моделировании были использованы физические модели, описывающие ловушки и их параметры, туннелирование частиц, явления переноса в диэлектриках и аморфных пленках. В результате моделирования получены зависимости времени открытия от размеров, расположения плавающих затворов и значения заряда на плавающих затворах.

Показано, что двухзатворные структуры pin-диода позволяют изменять время открытия в более широких пределах, чем однозатворные. Для программирования большого диапазона времен открытия pin-диода целесообразно использовать именно двухзатворные структуры. Полученные результаты свидетельствуют о расширении функциональных возможностей двухзатворной структуры.

**Ключевые слова:** pin-диод, программируемый pin-диод, Synopsys Sentaurus TCAD, плавающий затвор

**Для цитирования:** Программирование двухбитного pin-диода в среде Synopsys Sentaurus TCAD / А. А. Даниленко, А. В. Стрыгин, Н. И. Михайлов, В. В. Перепеловский, Я. Н. Паничев, В. В. Марочкин, В. Л. Иванов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 5. С. 51–59. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-51-59

**Alexander A. Danilenko, Anton V. Strygin, Nikolay I. Mikhailov, Vadim V. Perepelovsky**

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

5, Professor Popov Str., 197376, St. Petersburg, Russia

**Yaroslav N. Panichev**

JSC "Morion"

13A, KIM Pr., 199155, St. Petersburg, Russia

**Vladislav V. Marochkin**

Pixpolar Oy

10, Metallimiehenkuja, c/o Regus Kora, 02150, Espoo, Finland

**Vladimir L. Ivanov**

ITMO University

9, Lomonosova Str., 191002, St. Petersburg, Russia

## PROGRAMMING 2-BIT PIN DIODE IN SYNOPSIS TCAD

**Abstract.** The article is devoted to the modeling of a two-bit pin-diode. The possibility of programming opening time of the device based on the pin-diode is shown. The design consisting of a pin diode and two floating gates on the surface of *i*-region is considered. The addition of electrodes to the surface of the *i*-region makes it possible to regulate the concentration of electrons and holes within the larger limits in compare with the single-gate structure creating enriched and depleted are-as in the structure. Programming is carried out by applying the appropriate voltage to the control electrodes of the floating gates. It is shown that the charge generated on the floating gate changes characteristics of the *i*-region of the pin diode.

The key elements of complex simulation of the two-gate pin diode are simulation of charge accumulation mechanism on the floating gate, simulation of pin-diode opening time and calibration of numerical model. Simulation is performed in Synopsys Sentaurus TCAD. Physical models describing traps and their parameters, particle tunneling, transport phenomena in dielectrics and amorphous films are used in simulation. As a result of modeling, the opening time dependences on size, floating gate location and floating gate charge magnitude are obtained.

It is shown that the pin-diode 2-gate structures allow to change the opening time in a wider range than the single-gate ones. To program a large range of pin-diode opening times, it is 2 gate structure that is advisable to use. The obtained results indicate that it is possible to implement a two-bit programming pin-diode and expand its functionality.

**Key words:** pin-diode, programmable pin-diode, Synopsys Sentaurus TCAD, floating gate

**For citation:** Danilenko A. A., Strygin A. V., Mikhailov N. I., Perepelovsky V. V., Panichev Y. N., Marochkin V.V., Ivanov V. L. Programming 2-Bit Pin Diode in Synopsys TCAD. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2018, no. 5, pp. 51–59. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-5-51-59 (In Russian)

---

**Введение.** Дискретная металлизация поверхности *i*-области pin-диода привлекает внимание исследователей с точки зрения расширения функциональных возможностей такого рода устройств. Для проектирования таких полупроводниковых приборов целесообразно использовать приборно-технологическую систему автоматизированного проектирования (САПР). Примером САПР, решающей данную задачу, является TCAD (Technology Computer-Aided Design) и в частности Synopsys Sentaurus TCAD [1]–[8]. В последнее время было опубликовано несколько работ [9], [10], в которых исследовалось влияние металлических электродов, находящихся на поверхности *i*-области, на свойства pin-диода. Развитием этого направления является применение плавающих затворов на поверхности pin-диода [11].

В [12]–[14] для определения дозы падающего на диод ионизирующего излучения используется структура на основе полевого транзистора, включающая в себя pin-диод, выступающий в роли чувствительного элемента дозиметра, и плавающий затвор, который является общим для транзистора и pin-диода. Так, в [14] производилось моделирование дозиметра гамма-излучения с двумя полуплавающими затворами (Semifloating Gates (SFG)), расположенными на поверхности диода. Основная задача состояла в разработке дозиметра, поэтому не исследовалась возможность программирования свойств pin-диода с помощью плавающих затворов, нанесенных на *i*-область. В [11] рассматривается программирование однозатворного pin-диода только для фиксированных параметров плавающего затвора pin-диода.

Добавление электродов на поверхность  $i$ -области дает возможность регулировать концентрацию электронов и дырок в больших пределах в сравнении с однозатворной структурой, создавая обогащенные и обедненные области в структуре. Наличие плавающего и управляющего электродов на поверхности  $i$ -области позволяет программировать свойства  $\text{pin}$ -диода. Одним из программируемых свойств является время открытия  $\text{pin}$ -диода.

В статье исследуется зависимость времени открытия программируемого планарного  $\text{pin}$ -диода с двумя плавающими затворами – FGPIND (Floating-Gate-PIN-Diode) от положения и размеров плавающих затворов, а также от значения заряда, записанного на плавающих затворах. Сравняется время открытия FGPIND с одним и с двумя плавающими затворами.

**Топология.** Моделирование программируемого FGPIND реализовано в среде Synopsys Sentaurus TCAD [1]–[8]. Исследуемая структура (рис. 1) представляет собой  $\text{pin}$ -диод, имеющий несколько областей:

1 – высоколегированная  $p^+$ -область – легирована бором с концентрацией  $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ;

2 – высоколегированная  $n^+$ -область – легирована фосфором с концентрацией  $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ;

3 – слаболегированная  $i$ -область – легирована фосфором с концентрацией  $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ;

4 – полуизолирующая подложка;

5 – металлизация подложки;

6 – управляющий затвор из поликремния;

8 – плавающий затвор из нитрида кремния;

7, 9 – слои диэлектрика из оксида кремния, отделяющие управляющий затвор от плавающего и плавающий затвор от поверхности структуры.

Для регулировки времени открытия  $\text{pin}$ -диода на поверхности  $i$ -области друг за другом были

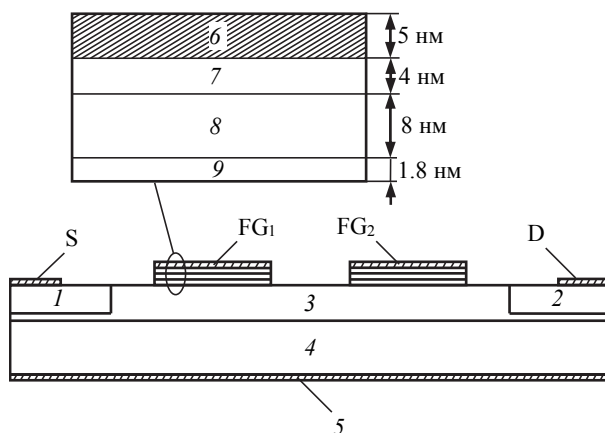


Рис. 1

расположены 2 плавающих затвора [15]–[17]. Плавающие затворы на рис. 1 обозначены как  $\text{FG}_1$  и  $\text{FG}_2$ . Сток и исток обозначены как D и S соответственно. В дальнейшем структура плавающего затвора, показанная на рис. 1 и обозначенная как FG, будет обозначаться как "плавающий затвор".

Для расчета данной структуры разработан программный код, позволяющий моделировать различные области FGPIND. Для моделирования структуры с плавающими затворами использовались следующие параметры: запись заряда на плавающий затвор выполнялась импульсом +11 В; стирание заряда импульсом –11 В; длительность записывающего и стирающего импульсов 4 мс; толщина туннельного диэлектрика 1.8 нм; толщина блокирующего диэлектрика 4 нм; толщина плавающего затвора на нитриде кремния 8 нм [15]–[17].

Для калибровки численной модели использовались результаты из [10].

**Физические модели, используемые при расчетах структуры  $\text{pin}$ -диода.** При моделировании FGPIND были использованы следующие физические модели [8]:

1. В программном коде среды Synopsys Sentaurus TCAD используется физическая модель, описывающая ловушки и их параметры, которую можно использовать при наличии ключевого слова Traps.

2. Физическая модель, описывающая туннелирование частиц, которая учитывается программой Synopsys TCAD при наличии в коде ключевых слов eBarrier Tunneling (для электронов) и hBarrier Tunneling (для дырок).

3. Модель Пула–Френкеля, для использования которой нужно ключевое слово Poole Frenkel. Эта модель используется для учета явлений переноса в диэлектриках и аморфных пленках. Модель описывает возможность протекания усиленной эмиссии для заряженных ловушек в случаях, когда потенциальный барьер понижен из-за очень высокой напряженности поля.

4. Модель рекомбинации Шокли–Рида–Холла, также называемая ловушечной рекомбинацией. Описывает переходы носителей между энергетическими зонами с помощью энергетических состояний, создаваемых примесями в запрещенной зоне. Для использования данной физической модели в программу была добавлена строчка: Recombination(SRH (Doping Dependence)).

5. Модель для описания подвижности носителей заряда, зависящей от концентрации примесей и поле-скоростной характеристики используемого

материала. В коде Synopsys TCAD исследуемой модели для учета таких зависимостей используется строчка: Mobility (Doping Dependence High Field Saturation).

Секция кода Physics представлена в приложении.

**Программирование рin-диода. Моделирование времени открытия FGPIND с одним и двумя плавающими затворами.** Рассматривается зависимость времени открытия FGPIND от размера и заряда плавающих затворов расположенных на поверхности *i*-области (см. рис. 1). Под временем открытия FGPIND в данном случае подразумевается время, за которое ток в цепи рin-диода возрастает до уровня 0.1 от значения установившегося тока.

Для рассмотрения результатов моделирования времени открытия FGPIND определим следующие понятия:

- за логический "0" будем принимать заряд, образующийся на плавающем затворе в результате приложенного к управляющему затвору напряжения  $-11$  В. Данное состояние плавающего затвора для однозатворной структуры обозначим FG(0). В случае двух плавающих затворов введем обозначение FG(00);

- за логическую "1" будем принимать заряд, образующийся на плавающем затворе в результате приложенного к управляющему затвору напряжения  $+11$  В (туннелирование электронов через диэлектрик обеспечивает отрицательный заряд плавающего затвора). Данное состояние плавающего затвора для однозатворной структуры обозначим FG(1). В случае двух плавающих затворов введем обозначение FG(11). Аналогичный смысл имеют обозначения FG(10) и FG(01).

Длина затвора однозатворной модели составляет  $7.0$  мкм, он расположен на расстоянии  $1.5$  мкм от стока и от истока. Длины затворов у двухзатворной модели равны  $2.0$  мкм каждая; расстояние между истоком и затвором FG<sub>1</sub>  $3.0$  мкм, а между стоком и затвором FG<sub>2</sub>  $2.0$  мкм; расстояние же между самими затворами составляет  $1.0$  мкм. Полученная зависимость тока  $I_{\text{drain}}$  через FGPIND от времени, прошедшего с начала одиночного открывающего прямоугольного импульса, приведена на рис. 2. Открывающий импульс:  $4$  В; длительность фронта  $0.1$  нс. За начало отсчета по оси абсцисс выбрано время подачи одиночного открывающего импульса.

Из полученных результатов (рис. 2) следует, что скорость изменения тока зависит от параметров FGPIND (число затворов и заряд на затворах).

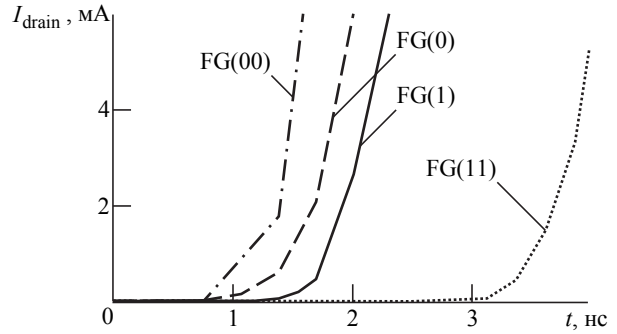


Рис. 2

Для однозатворных структур скорость изменения тока слабо зависит от заряда на плавающем затворе: для состояния FG(0) ток  $4$  мА достигается за  $1.85$  нс, а для FG(1) ток  $4$  мА достигается за  $2.12$  нс. Разность составляет  $0.27$  нс. Для двухзатворных структур FG(00) и FG(11) аналогичная разность  $2.4$  нс.

Таким образом, двухзатворные структуры FGPIND позволяют изменять время открытия FGPIND в более широких пределах, чем однозатворные. Для программирования большого диапазона времен открытия FGPIND целесообразно использовать двухзатворные структуры.

**Программирование рin-диода. Моделирование времени открытия двухзатворного FGPIND для различных длин плавающих затворов.** Рассмотрим зависимость времени открытия рin-диода от длины одного из плавающих затворов при постоянной длине другого плавающего затвора для состояния FG(11). На рис. 3 приведены зависимости времени открытия FGPIND от длин плавающих затворов FG<sub>1</sub> и FG<sub>2</sub> (сплошная линия – зависимость задержки открытия от длины FG<sub>1</sub> при постоянстве длины FG<sub>2</sub> –  $2.0$  мкм; штриховая линия – зависимость задержки открытия от длины FG<sub>2</sub> при постоянстве длины FG<sub>1</sub> –  $2.0$  мкм). На оси абсцисс отложены длины затворов FG<sub>1</sub> и FG<sub>2</sub> в зависимости от рассматриваемой кривой. На оси ординат отложена разница времен

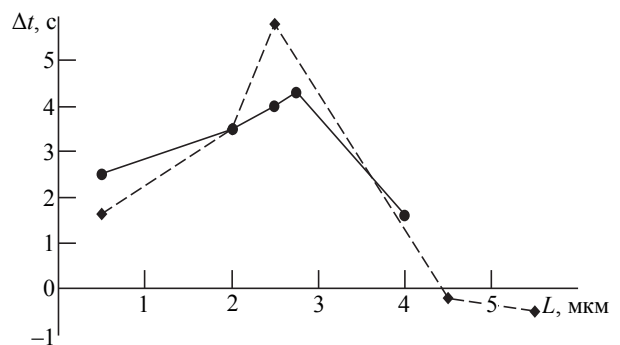


Рис. 3

открытия  $-\Delta t$  беззатворной структуры  $\text{pin}$ -диода и двухзатворного FGPIND, т. е.  $\Delta t = t_2 - t_1$ , где  $t_2$  – время открытия двухзатворной структуры,  $t_1$  – время открытия исходной (беззатворной) структуры. За ноль на оси ординат выбрано время открытия беззатворного  $\text{pin}$ -диода. Фактически, на рис. 3 отображается, насколько время открытия двухзатворной структуры отличается от времени открытия исходной (беззатворной) структуры.

Из полученных результатов следует, что двухзатворные структуры FGPIND с длинами плавающих затворов 2 и 2.5 мкм позволяют управлять временем открытия FGPIND в наибольших пределах в рамках рассматриваемой топологии. Например, разница времен открытия при наличии зарядов и их отсутствии на плавающих затворах ( $\Delta t$ ) составляет 5.8 нс. Отрицательные значения  $\Delta t$  свидетельствуют о том, что двухзатворная структура с длинами затворов  $\text{FG}_1$  и  $\text{FG}_2$  5.5 и 2.0 мкм соответственно позволяет уменьшить время открытия структуры FGPIND относительно беззатворной структуры.

На рис. 4 представлены распределения электростатического потенциала в  $i$ -области структуры FGPIND после записи заряда на плавающие затворы для трех различных длин затворов  $\text{FG}_1$  и  $\text{FG}_2$ : 5.5 и 2.0 мкм (рис. 4, а); 2.5 и 2.0 мкм (рис. 4, б); 0.5 и 0.5 мкм (рис. 4, в). Из распределений можно сделать вывод о наличии записанных зарядов на плавающих затворах и о захвате дырок в области под плавающими затворами. Длины затворов 2.5 и 2.0 мкм (рис. 4, б) приводят к умень-

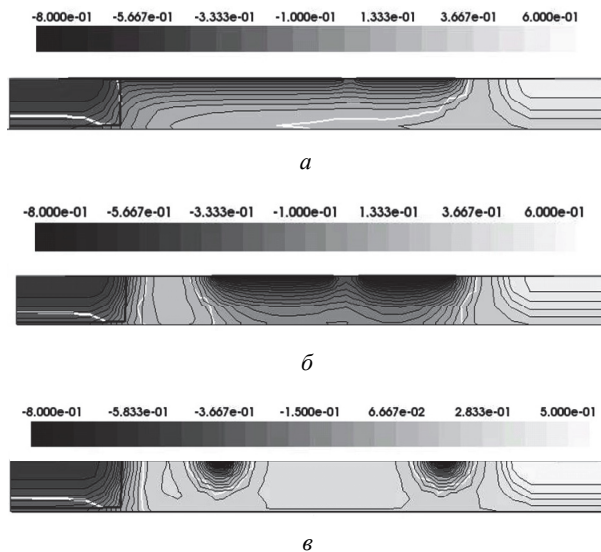


Рис. 4

шению региона рекомбинации носителей заряда в  $i$ -области, что, в свою очередь, приводит к увеличению времени открытия  $\text{pin}$ -диода (рис. 3). Длины затворов 5.5 и 2.0 мкм (рис. 4, а) фактически приводят к уменьшению длины  $i$ -области и, как следствие, к снижению времени открытия  $\text{pin}$ -диода (рис. 3).

**Двухбитное программирование  $\text{pin}$ -диода.**

Двухбитное программирование FGPIND реализовано для четырех состояний плавающих затворов: FG(00), FG(01), FG(10) и FG(11). Обозначение FG(01) соответствует следующему состоянию двух плавающих затворов: на затворе  $\text{FG}_1$  записан "0", на затворе  $\text{FG}_2$  записана "1". Остальные обозначения имеют аналогичный смысл. Программирование выполнялось для нескольких длин плавающих затворов: 0.5, 1.0, 2.0, 2.5 мкм. Необходимо отметить, что в рассмотренном ранее случае (рис. 2) одинаковые заряды записаны на оба затвора:  $\text{FG}_1$  и  $\text{FG}_2$ , а в этой части статьи рассматриваются состояния с различными зарядами на двух плавающих затворах, т. е. FG(01) и FG(10). Порядок формирования состояний, соответствующих "0" и "1", описан ранее.

Результаты моделирования приведены на рис. 5. За ноль на оси абсцисс принято время открытия беззатворной структуры. Остальные времена открытия отложены относительно времени открытия беззатворной структуры (аналогично рис. 2).

Зависимости на рис. 5 показывают возможность программирования FGPIND в смысле задания четырех различных времен открытия  $\text{pin}$ -структуры в зависимости от состояния плавающих затворов  $\text{FG}_1$  и  $\text{FG}_2$ . Программирование осуществляется записью соответствующих зарядов на плавающие затворы  $\text{FG}_1$  и  $\text{FG}_2$ , находящиеся на поверхности  $i$ -области, причем плавающие затворы с длиной порядка 0.5 мкм существенно не влияют на время открытия FGPIND-структуры, в то время как структура FGPIND с  $\text{FG}_1 = 2.5$  мкм,

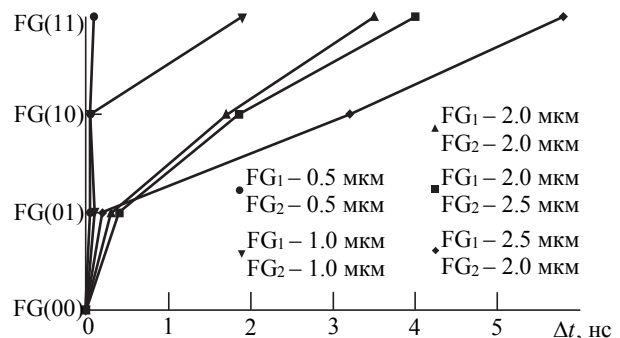


Рис. 5

$FG_2 = 2.0$  мкм наиболее чувствительна к программированию времени открытия в данной топологии. Так двухзатворные структуры FGPIND с  $FG_1 = 2.5$  мкм и  $FG_2 = 2.0$  мкм позволяют изменять время открытия FGPIND до 5.8 нс.

**Заключение.** Зависимости на рис. 4 показывают возможность двухбитного программирования FGPIND в смысле задания четырех различных времен открытия pin-структуры.

Двухзатворные структуры FGPIND позволяют изменять время открытия FGPIND в более широких пределах, чем однозатворные. Для программирования большого диапазона времен открытия

FGPIND целесообразно использовать двухзатворные структуры.

Двухзатворные структуры FGPIND с длинами плавающих затворов  $FG_1 = 2.5$  мкм и  $FG_2 = 2.0$  мкм позволяют изменять время открытия FGPIND в наибольших пределах в рамках рассматриваемой топологии FGPIND.

Двухзатворная структура с длинами затворов  $FG_1$  и  $FG_2$  5.5 и 2.0 мкм соответственно позволяет уменьшить время открытия структуры FGPIND относительно беззатворной структуры в рамках рассматриваемой топологии FGPIND.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров Е. А., Мясников А. М. Приборно-технологическое моделирование с помощью пакета Sentaurus TCAD: учеб.-метод. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. 115 с.
2. Перепеловский В. В., Михайлов Н. И., Марочкин В. В. Разработка электронных устройств в среде Synopsys Sentaurus TCAD: лаб. практикум. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2010. 52 с.
3. Перепеловский В. В., Михайлов Н. И., Марочкин В. В. Введение в приборно-технологическое моделирование устройств микроэлектроники: лаб. практикум. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2011. 49 с.
4. Макаручук В. В., Курейчик В. М., Зотов С. К. Особенности применения системы технологического моделирования TCAD // Инженерный вестн. 2012. Вып. 9. С. 1–7.
5. Окунев А. Ю., Левицкий А. А. Моделирование диодной структуры в среде. URL: [http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/pdf/d03/s24/s24\\_014.pdf](http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/pdf/d03/s24/s24_014.pdf) (дата обращения 07.11.2018)
6. Глушко А. А. Приборно-технологическое моделирование в системе TCAD Sentaurus: учеб.-метод. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. 64 с.
7. Основы работы в среде приборно-технологической САПР SENTAURUS: учеб.-метод. пособие / Р. П. Алексеев, Е. Н. Бормонтов, Г. В. Быкадорова, А. Ю. Ткачев, А. Н. Цоцорин. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2017. 96 с.
8. Sentaurus™ Device User Guide, Version K-2015.06. URL: [http://www.sentaurus.dsod.pl/manuals/data/sdevice\\_ug.pdf](http://www.sentaurus.dsod.pl/manuals/data/sdevice_ug.pdf) (дата обращения 07.11.2018)
9. Ultra Low Loss Trench Gate PCI-PiN Diode with  $V_F < 350$  mV. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5890796/> (дата обращения 07.11.2018)
10. Responsivity Improvement for Short Wavelengths Using Full-Gated PIN Lateral SiGe Diode. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7731366/> (дата обращения 07.11.2018)
11. Программирование однозатворного PIN диода / Д. В. Щукин, Я. Н. Паничев, Н. И. Михайлов, В. В. Перепеловский, В. В. Марочкин // Сб. стат. VI Всерос. конф. "Электроника и микроэлектроника СВЧ". СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2017. С. 475–477.
12. Study of Device Physics in Impact Ionisation MOSFET using Synopsys TCAD tools. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7002450/> (дата обращения 07.11.2018)
13. Feasibility Study of Semifloating Gate Transistor Gamma-Ray Dosimeter / Ying Wang, Zhi-Qiang Xiang, Hai-Fan Hu, Fei Cao // IEEE Electron Device Letters. 2015. Vol. 36, № 2. P. 99–101.
14. A Semifloating Gate Controlled Camel Diode Radiation Dosimeter / Ying Wang, Zhi-Qiang Xiang, Yue Hao, and Cheng-Hao Yu // IEEE Transactions on Electron Devices. 2016. Vol. 63, № 5. P. 2200–2204.
15. Shin-ichi Minami, Yoshiaki Kamigaki. A Novel MONOS Nonvolatile Memory Device Ensuring 10-Year Data Retention after 10' Erase/Write Cycles // IEEE Transactions on Electron Devices. 1993. Vol. 40, № 11. P. 2011–2017.
16. Новиков Ю. Н. Энергонезависимая память, основанная на кремниевых нанокластерах // Физика и техника полупроводников. 2009. Т. 43, вып. 8. С. 1078–1083.
17. Memristive device based on a depletion-type SONOS field effect transistor / N. Himmel, M. Ziegler, H. Mähne, S. Thiem, H. Winterfeld, H. Kohlstedt // Semiconductor Science and Technology. 2017. Vol. 32, № 6. article id. 06LT01. doi: 10.1088/1361-6641/aa6c86

Секция кода Physics имеет следующий вид:

```
Physics {
    eBarrierTunneling "Gateoxb_Substrate"
    hBarrierTunneling "Gateoxb_Substrate"
    eBarrierTunneling "Gateoxt_Polygate"
    hBarrierTunneling "Gateoxt_Polygate"
    eBarrierTunneling "Gateoxt1_Polygate1"
    hBarrierTunneling "Gateoxt1_Polygate1"
}
Physics(Material="Silicon") {
    Recombination(SRH(DopingDependence))
    Mobility(DopingDependence HighFieldSaturation)
}
Physics(Material="NitrideAsSemiconductor") {
    Traps(
        (Donor Level EnergyMid= 2.5 FromConductionBand
        Conc= 1e19
        eXSection= 1e-13 hXSection= 1e-13
        eBarrierTunneling(NonLocal= "Gateoxb_Substrate" NonLocal= "Gateoxt_Polygate" Non-
Local= "Gateoxt1_Polygate1")
        hBarrierTunneling(NonLocal= "Gateoxb_Substrate" NonLocal= "Gateoxt_Polygate"
NonLocal= "Gateoxt1_Polygate1")
        PooleFrenkel
        TrapVolume= 1e-15
        )
        (Acceptor Level EnergyMid= 1.0 FromConductionBand
        Conc= 1e19
        eXSection= 1e-13 hXSection= 1e-13
        eBarrierTunneling(NonLocal= "Gateoxb_Substrate" NonLocal= "Gateoxt_Polygate" Non-
Local= "Gateoxt1_Polygate1")
        hBarrierTunneling(NonLocal= "Gateoxb_Substrate" NonLocal= "Gateoxt_Polygate"
NonLocal= "Gateoxt1_Polygate1")
        PooleFrenkel
        TrapVolume= 1e-15)))}
```

Статья поступила в редакцию 17 сентября 2018 г.

---

**Даниленко Александр Александрович** – бакалавр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2018), магистрант 1-го курса Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им В. И. Ульянова (Ленина). Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – моделирование устройств микроэлектроники в среде Synopsys Sentaurus TCAD.

E-mail: arguna96@yandex.ru

**Стрыгин Антон Владимирович** – бакалавр по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2018), магистрант 1-го курса Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им В. И. Ульянова (Ленина). Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – моделирование устройств микроэлектроники в среде Synopsys Sentaurus TCAD.

E-mail: golden\_raccoon@mail.ru

**Михайлов Николай Иванович** – кандидат физико-математических наук (1982), доцент (1985) кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 25 научных работ. Сфера научных интересов – математическое и компьютерное моделирование полупроводниковых приборов.

E-mail: miknikiv51@gmail.com

**Перепеловский Вадим Всеволодович** – кандидат физико-математических наук (1992), доцент (1995) кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 30 научных публикаций. Сфера научных интересов – моделирование приборов твердотельной электроники.

E-mail: vvperpelovsky@gmail.com

**Паничев Ярослав Николаевич** – магистр по направлению "Физическая электроника" (2016) Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им В. И. Ульянова (Ленина). Инженер-технолог производства кварцевых резонаторов в АО "Морион". Автор четырех научных публикаций. Сфера научных интересов – моделирование приборов твердотельной электроники.

E-mail: ynpanichev@gmail.com

**Марочкин Владислав Викторович** – кандидат физико-математических наук (2016, Финляндия), менеджер проектов в компании Piholaag. Автор 10 научных работ. Сфера научных интересов – моделирование приборов твердотельной электроники.

E-mail: vladislav.marochkin@gmail.com

**Иванов Владимир Леонидович** – кандидат технических наук (1988), старший научный сотрудник (1991), доцент кафедры теплофизики и теоретических основ теплохладотехники Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – моделирование объектов и систем управления, энерго-ресурсосберегающие технологии.

E-mail: v78432@mail.ru

---

## REFERENCES

1. Makarov E. A., Myasnikov A. M. *Priborno-tekhnologicheskoe modelirovanie s pomoshch'yu paketa Sentaurus TCAD* [Instrument-Based Simulation Using the Sentaurus TCAD Package]. Novosibirsk, *Izd-vo NGTU*, 2008, 115 p. (In Russian)
2. Perepelovskii V. V., Mikhailov N. I., Marochkin V. V. *Razrabotka elektronnykh ustroystv v srede Synopsys Sentaurus TCAD* [Development of Electronic Devices in Synopsys Sentaurus TCAD Environment]. SPb., *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2010, 52 p. (In Russian)
3. Perepelovskii V. V., Mikhailov N. I., Marochkin V. V. *Vvedenie v priborno-tekhnologicheskoe modelirovanie ustroystv mikroelektroniki* [Introduction to Instrument-Technological Modeling of Microelectronic Devices]. SPb., *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2011, 49 p. (In Russian)
4. Makarchuk V. V., Kureichik V. M., Zotov S. K. Application Features of Technological Modeling System TCAD. *Inzhenernyi vestnik* [Engineering Bulletin]. 2012, iss. 9, pp. 1–7. (In Russian)
5. Okunev, A. Yu. Levitskii A. A. Modeling Diode Structure in the Environment. Available at: [http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/pdf/d03/s24/s24\\_014.pdf](http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/pdf/d03/s24/s24_014.pdf) (accessed: 07.11.2018) (In Russian)
6. Glushko A. A. *Priborno-tekhnologicheskoe modelirovanie v sisteme TCAD Sentaurus* [Instrument and Technological Modeling in TCAD Sentaurus System]. Moscow, *Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman*, 2015, 64 p. (In Russian)
7. Alekseev R. P., Bormontov E. N., Bykadorova G. V., Tkachev A. Yu., Tsotsorin A. N. *Osnovy raboty v srede priborno-tekhnologicheskoi SAPR SENTAURUS* [Basic Operation in CAD SENTAURUS]. Voronezh, *Izd-vo VGU Voronezh*, 2017, p. 96. (In Russian)
8. Sentaurus™ Device User Guide, Version K-2015.06. Available at: [http://www.sentaurus.dsod.pl/manuals/data/sdevice\\_ug.pdf](http://www.sentaurus.dsod.pl/manuals/data/sdevice_ug.pdf) (accessed: 07.11.2018)
9. Ultra Low Loss Trench Gate PCI-PiN Diode with VF<350mV. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5890796/> (accessed: 07.11.2018)



10. Responsivity Improvement for Short Wavelengths Using Full-Gated PIN Lateral SiGe Diode. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7731366/> (accessed: 07.11.2018)

11. Shchukin D. V., Panichev Ya. N., Mikhailov N. I., Perepelovskii V. V., Marochkin V. V. *Programmirovanie odnozhatvornogo PIN diode* [Programming Single Gate PIN Diode]. Collected papers of VI All-Russia conf. "Electronics and Microelectronics Microwave". SPb., *Izd-vo SPbGETU "LETI"*, 2017, pp. 475–477. (In Russian)

12. Study of Device Physics in Impact Ionisation MOSFET using Synopsys TCAD tools. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7002450/> (accessed: 07.11.2018)

13. Ying Wang, Zhi-Qiang Xiang, Hai-Fan Hu, Fei Cao. Feasibility Study of Semifloating Gate Transistor Gamma-Ray Dosimeter. IEEE Electron Device Letters. 2015, vol. 36, no. 2, pp. 99–101.

14. Ying Wang, Zhi-Qiang Xiang, Yue Hao, and Cheng-Hao Yu. A Semifloating Gate Controlled Camel Diode Radiation Dosimeter. IEEE Transactions on Electron Devices. 2016, vol. 63, no. 5, pp. 2200–2204.

15. Shin-ichi Minami, Yoshiaki Kamigaki. A Novel MONOS Nonvolatile Memory Device Ensuring 10-Year Data Retention after 10<sup>7</sup> Erase/Write Cycles. IEEE Transactions on Electron Devices. 1993, vol. 40, no. 11, pp. 2011–2017.

16. Novikov Yu. N. Non-volatile memory based on silicon nanoclusters. Semiconductors. 2009, vol. 43, iss. 8, pp. 1078–1083. (In Russian)

17. Himmel N., Ziegler M., Mähne H., Thiem S., Winterfeld H., Kohlstedt H. Memristive device based on a depletion-type SONOS field effect transistor. Semiconductor Science and Technology. 2017, vol. 32, no. 6, article id. 06LT01. doi: 10.1088/1361-6641/aa6c86

Received September, 17, 2018

**Alexander A. Danilenko** – Bachelor's Degree in Electronics and Nanoelectronics (2018), Master's Degree Student of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 1 scientific publications. Area of expertise: simulation of microelectronics devices in the Synopsys Sentaurus TCAD environment.  
E-mail: arguna96@yandex.r

**Anton V. Strygin** – Bachelor's Degree in Electronics and Nanoelectronics (2018), Master's Degree Student of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 1 scientific publications. Area of expertise: simulation of microelectronics devices in the Synopsys Sentaurus TCAD environment.  
E-mail: golden\_raccoon@mail.ru

**Nikolai I. Mikhailov** – Ph.D. in Physics and Mathematics (1982), Associate Professor (1985) of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 25 scientific publications. Area of expertise: mathematical and computer simulation of semiconductor devices.  
E-mail: miknikiv51@gmail.com

**Vadim V. Perepelovskiy** – Ph.D. in Physics and Mathematics (1992), Associate Professor (1995) of the Department of Physical Electronics and Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: simulation of solid-state electronics devices.  
E-mail: vvperepelovsky@gmail.com

**Yaroslav N. Panichev** – Master's Degree in Physical Electronics (2016) of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". Quartz resonator production engineer in JSC "Morion". The author of 4 scientific publications. Area of expertise: simulation of solid-state electronics devices.  
E-mail: ynpanichev@gmail.com

**Vladislav V. Marochkin** – Ph.D. in Physics and Mathematics (2016, Finland), Project Manager for Pixpolar Oy. The author 10 scientific publications. Area of expertise: simulation of solid-state electronics devices.  
E-mail: vladislav.marochkin@gmail.com

**Vladimir L. Ivanov** – Ph.D. in Engineering (1988), Senior Researcher (1991), Associate Professor of the Department of Thermal Physics and Theoretical Foundations of Thermal Engineering of ITMO University The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: modeling of objects and control systems; energy-saving technologies.  
E-mail: v78432@mail.ru