

Н.К. Трубочкина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННЕГО И ПОВЕРХНОСТНОГО p-n ПЕРЕХОДОВ С МИНИМАЛЬНЫМ ТОПОЛОГИЧЕСКИМ РАЗМЕРОМ 20 нм И ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА ЭЛЕКТРОДЫ

В статье приведены результаты и качественный анализ 2D и 3D моделирования внутреннего и поверхностного p-n переходов с минимальным топологическим размером 20 нм с электрическим воздействием на электроды. Промоделированы 17 основных параметров наноструктур в 2D и 3D реализациях. Выявлены тонкие физические отличия, определены варианты технологической реализуемости.

Ключевые слова: p-n переход, топологический размер, наноструктуры

Введение

В связи с актуальной потребностью в создании 3D СБИС с максимальной информационной плотностью [1-5] возникает необходимость в физическом моделировании схмотехники не транзисторной, а более оптимальной – переходной [6-12].

Как показали эксперименты, математические модели элементов переходной схмотехники содержат минимальное количество переходов и физических областей с различными свойствами. Многие математические модели 3D ИС, разработанные в переходной схмотехнике, «совпадают» по структуре с моделями органических молекул, имеющими те же логические функции [13].

Примерами переходов твердотельной схмотехники являются:

- $S_i - S_j$ переход – переход между полупроводниками, например;
- $p-n$ переход – переход (граница) между полупроводниками p и n типа, выполняющий диодную функцию. Именно этот переход является основным компонентом переходной твердотельной схмотехники [6-12], и именно моделированию его свойств и характеристик для последующего использования в синтезе переходных элементов наносхмотехники посвящена эта статья;

N.K. Trubochkina

INTERNAL AND SURFACE p-n JUNCTIONS SIMULATION WITH A MINIMUM 20 nm TOPOLOGICAL SIZE AND ELECTRICAL EFFECT ON ELECTRODES

The 2D and 3D simulation results and qualitative analysis of internal and surface p-n junctions with a minimum 20 nm topological sizes with electrical effect on electrodes are indicated in the article. 17 main nanostructure parameters in 2D and 3D realizations are modeling. The thin physical differences are revealed. Also variants of technological marketability are determined.

Keywords: p-n junction, topological size, nanostructure

- $S_i - D_j$ переход – переход между полупроводником и диэлектриком;
- $S_i - M_j$ переход – переход между полупроводником и металлом (диод Шоттки), переходы между прозрачными и непрозрачными слоями в оптоэлектронных элементах и т.д.

Так как компонент твердотельной $p-n$ схмотехники – физический переход между p и n топологическими областями [11], и именно из него будут синтезированы последующие элементы переходной схмотехники, то его анализу следует уделить большое внимание, особенно с переходом на топологические размеры, измеряемые нанометрами.

Исходя из технологических особенностей, различают два типа $p-n$ перехода:

1. внутренний (когда переход формируется внутри другого материала) $p>n$ или $A(p,n)$;
2. поверхностный (когда переход формируется на поверхности другого материала) pn или $C(p,n)$.

2D моделирование внутреннего p-n перехода с минимальным топологическим размером 20 нм и электрическим воздействием на электроды ($p>n$)

В схемах (моделях) переходной схмотехники одинарную стрелку $>$ можно дешифровать как «содержит», т.е. структурная формула $p>n$ прочитывается как p содержит n . На рис. 1-3 показаны этапы

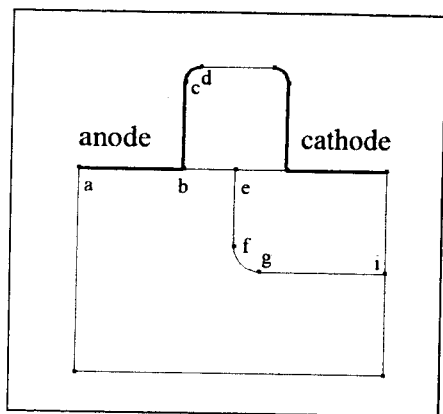


Рис. 1. Определение 2D конструкции (сечения) внутреннего р-п перехода

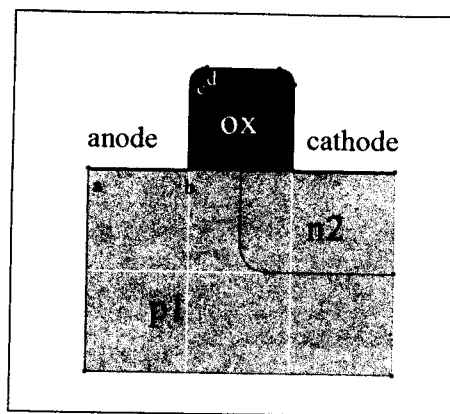


Рис. 2. Назначение материалов внутреннего р-п перехода

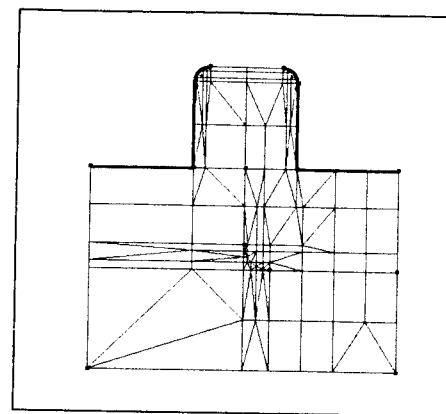


Рис. 3. Задание сетки для 2D моделирования сечения внутреннего р-п перехода

подготовки данных для 2D моделирования р>п перехода в TCAD Synopsys [14]. Это система двух- и трехмерного расчета широкого ряда полупроводниковых приборов – от субмикронных МДП-транзисторов до больших и мощных биполярных структур.

На рис. 1 определена 2D конструкция (сечение) внутреннего р-п перехода. Физическому р-п переходу соответствует линия efgi, находящаяся внутри основного материала полупроводника. Наличие проводников, через которые осуществляется электрическое воздействие на полупроводниковые области, может быть определено заданием топологии и свойств контактов. Так, линия abcd – линия соприкосновения проводника с остальной конструкцией – соответствует контакту анода (anode), аналогичная, симметрично расположенная линия – контакту катода (cathode).

На рис. 2. показано назначение материалов для внутреннего р-п перехода: область p1 – область кремния р-типа (область с дырочной проводимостью), область n2 – область кремния п-типа (область с электронной проводимостью), ox – изолирующий контакты окисел SiO₂.

На этом же этапе задаются концентрации носителей в областях интегральной структуры внутреннего р-п перехода. Зададим значения концентрации для дырок в области p1 10¹⁵ носителей/см³, а для электронов в области n2 – 10¹⁹ носителей/см³.

На рис. 2 можно видеть белые линии в области p1 – это топологическая сетка с размером ячейки X_g=20 нм и Y_g=20 нм. Размер ячейки определен исходя из минимального топологического размера в 20 нм. На основе этого ограничения, размеры топологических частей структуры представлены значениями в таблице 1.

После определения типа, размеров и концентрации носителей в областях интегральной структуры задается расчетная сетка для моделирования характеристик внутреннего р-п перехода (рис. 3).

Таблица 1. Топологические размеры для моделирования внутреннего р-п перехода

	p1	n2	ox	anode	cathode
Ширина W _x (нм)	60	30	20	20	20
Высота H _y (нм)	40	20	20	20	20

В данном эксперименте максимальный размер расчетной сетки был выбран 10 нм, минимальный – 2,5 нм.

На рис. 3 видно, что более густая сетка в области самого перехода, а также в областях мелкомасштабных изменений структуры, в частности в областях стравленного окисла. Использование минимального размера расчетной сетки в случае топологической необходимости позволяет минимизировать время моделирования структуры. В случае необходимости минимальный и максимальный размер расчетной сетки можно менять.

Используемые физические и математические модели для моделирования в Sentaurus Device (TCAD Synopsys 2008 [14])

Физические явления в полупроводниковых субмикронных приборах очень сложны и, в зависимости от приложений, описываются дифференциальными уравнениями в частных производных различного уровня сложности. Коэффициенты и граничные условия уравнений (подвижности, скорости рекомбинации носителей, параметров, зависящих от материалов, интерфейса и граничных условий контакта) зависят от микро и нано физики, самой структуры и условий воздействия на структуру. Sentaurus Device (TCAD Synopsys [14]) решает произвольные комбинации транспортных уравнений и физических моделей, ко-

торые учитывают возможность моделирования всех спектров полупроводниковых приборов, от силовых приборов до наноустройств и сложных гетероструктур.

Далее приведены основные физические модели и уравнения, используемые при моделировании в Sentaurus Device.

Транспортные уравнения

В зависимости от моделируемой структуры и уровня требуемой точности можно выбирать четыре различных режима моделирования:

Диффузионный. Изотермическое моделирование, описанное базисными полупроводниковыми уравнениями. Подходит для маломощных устройств с длинными активными областями.

Термодинамический. Учитывается саморазогрев. Подходит для устройств с низким теплообменом, особенно для мощных устройств с длинными активными областями.

Гидродинамический. Учитывается транспорт энергии носителя. Подходит для устройств с маленькими активными областями.

Монте Карло. Позволяет моделировать устройство в выбранном окне (зоне).

В Sentaurus Device транспортная модель может быть выбрана независимо или для носителей, или транспортом можно пренебрегать, принимая постоянный квазиуровень Ферми для невыбранного носителя. То же для уравнения энергетического баланса. Если рассчитывается температура только одного носителя, температура другого считается равной температуре решетки.

Уравнение Пуассона и уравнения непрерывности

Используются три основных уравнения для переноса носителей в полупроводниковых приборах – уравнение Пуассона и уравнения непрерывности для дырок и электронов.

Уравнение Пуассона:

$$\epsilon \nabla \varphi = -q(p - n + N_D - N_A) - \rho_{\text{trap}}, \quad (1)$$

где ϵ – электрическая проницаемость; q – элементарный заряд электрона; n и p – электронная и дырочная плотности; N_D – концентрация ионизированных доноров; N_A – концентрация ионизированных акцепторов; ρ_{trap} – плотность заряда, которой пренебрегают.

Уравнения непрерывности для электронов и дырок:

$$\nabla \cdot \vec{J}_n = qR_{\text{net}} + q \frac{\partial n}{\partial t} \quad (2)$$

$$-\nabla \cdot \vec{J}_p = qR_{\text{net}} + q \frac{\partial p}{\partial t} \quad (3)$$

где R_{net} – скорость электронно-дырочной рекомбинации в решетке; J_n – электронная плотность тока; J_p – плотность тока дырок.

Диффузионная модель

Диффузионная модель широко используется для моделирования переноса носителей в полупроводниках и определена базисными полупроводниковыми уравнениями (1-3), где текущие плотности для электронов и дырок определяются по формулам (4) и (5) соответственно:

$$\vec{J}_n = -nq\mu_n \nabla \Phi_n \quad (4)$$

$$\vec{J}_p = -pq\mu_p \nabla \Phi_p \quad (5)$$

где μ_n и μ_p – электронная и дырочная подвижность; Φ_n и Φ_p – квази-потенциалы Ферми для электронов и дырок соответственно.

Более подробное описание различных физических моделей, используемых при моделировании структур, можно найти в полном описании TCAD Synopsys [14].

Файл для моделирования

Файл для моделирования p-n перехода состоит из нескольких частей: см. схему 1. При использовании данного расчетного файла были получены результаты моделирования, представленные на рис. 4, 5, 6.

Время моделирования составило 62 секунды на ПК с процессором 2,6 ГГц и оперативной памятью 1 Гб.

Результаты 2D моделирования внутреннего p-n перехода

Результаты моделирования можно разделить на две части: значения функций в сечении наноструктуры внутреннего p-n перехода (рис. 4, 5); графики функций.

На рис. 4 представлены результаты моделирования в сечении внутреннего p-n перехода для следующих функций: а) скорость дырок; б) квазипотенциал Ферми для дырок; в) подвижность дырок; г) плотность дырок; д) плотность тока дырок; е) скорость электронов; ж) квазипотенциал Ферми для электронов; з) подвижность электронов; и) плотность электронов.

На рис. 5 представлены результаты моделирования в сечении внутреннего p-n перехода для следующих функций: а) плотность тока электронов; б) пространственный заряд; в) квазипотенциал Ферми; г) электростатический потенциал; д) напряженность электрического поля; е) концентрация носителей; ж) концентрация доноров; з) концентрация акцепторов; и) на этом рисунке повторена сетка и система узлов, в которых рассчитывались 17 вышеперечисленных функций.

На рис. 6 представлены графики следующих функций для внутреннего p-n перехода, в зависимости от входного (на аноде) напряжения: а) ток дырок в области катода; б) ток дырок в области анода; в) ток

Схема 1

1. Блок File, в котором задаются имена входных и выходных файлов (во входных файлах содержится описание структуры, полученное на предыдущих этапах)

2. Блок Electrode, в котором описываются электроды

3. Блок Physics, в котором учитываются дополнительные физические эффекты, помимо стандартных

4. Блок Plot, в котором задается список моделируемых функций

5. Блок Solve. В нем определяются основные уравнения моделирования, условия моделирования, изменения входных функций

```

File {
  * Input Files
  Grid = "PN_in_1_msh.tdr"
  Doping = "PN_in_1_msh.tdr"

  * Output Files
  Current = "PN_in_1_rs.plt"
  Plot = "PN_in_1_rs.tdr"
  Output = "PN_in_1_rs.log"
}

Electrode {
  { Name="anode" Voltage=0.0 }
  { Name="cathode" Voltage=0.0 Resistor=100 }
}

Physics {
  Mobility( DopingDep HighFieldSat Enormal )
  EffectiveIntrinsicDensity( OldSlotboom )
}

Plot {
  eDensity hDensity eCurrent hCurrent
  Potential SpaceCharge ElectricField
  eMobility hMobility eVelocity hVelocity
  Doping DonorConcentration AcceptorConcentration
}

Solve {
  *- Build-up of initial solution:
  Coupled(Iterations=100){ Poisson }
  Coupled{ Poisson Electron Hole }

  *- Bias cathode to target bias
  Quasistationary(
    InitialStep=0.01 Increment=1.35
    MinStep=1e-5 MaxStep=0.2
    Goal{ Name="cathode" Voltage= 0.05 }
  ){ Coupled{ Poisson Electron Hole } }

  *- Anode voltage sweep
  Quasistationary(
    InitialStep=1e-3 Increment=1.35
    MinStep=1e-5 MaxStep=0.05
    Goal{ Name="anode" Voltage= 1.5 }
  ){ Coupled{ Poisson Electron Hole } }
}
    
```

электронов в области катода; г) ток электронов в области анода; д) общий ток в области катода; е) общий ток в области анода; ж) заряд в области катода; з) заряд в области анода; и) функция входного напряжения (на аноде) от времени.

Важнейшим результатом моделирования является подтверждение наличия в наноструктуре p-n перехода барьерной функции (см. вольтамперную характеристику перехода, рис. 6е), что является определяющим

условием для дальнейшего синтеза переключаемых наноустройств в переходной схемотехнике.

3D моделирование внутреннего p-n перехода с минимальным топологическим размером 20 нм и электрическим воздействием на электроды (p>n)

На рис. 7-9 показаны этапы подготовки данных для 3D моделирования внутреннего p-n перехода (p>n).

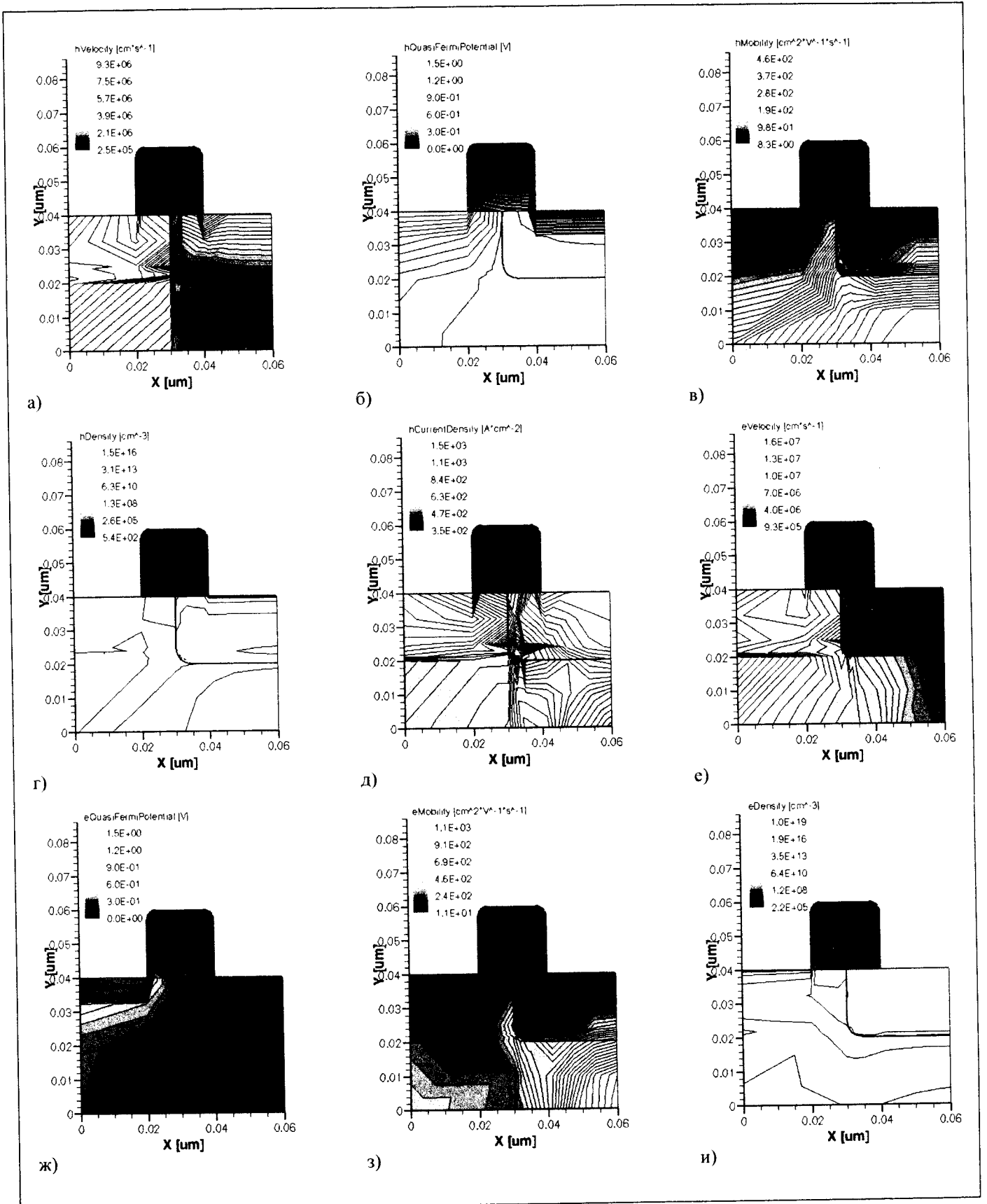


Рис. 4. Результаты моделирования в сечении внутреннего p-n перехода для следующих функций: а) скорость дырок; б) квазипотенциал Ферми для дырок; в) подвижность дырок; г) плотность дырок; д) плотность тока дырок; е) скорость электронов; ж) квазипотенциал Ферми для электронов; з) подвижность электронов; и) плотность электронов

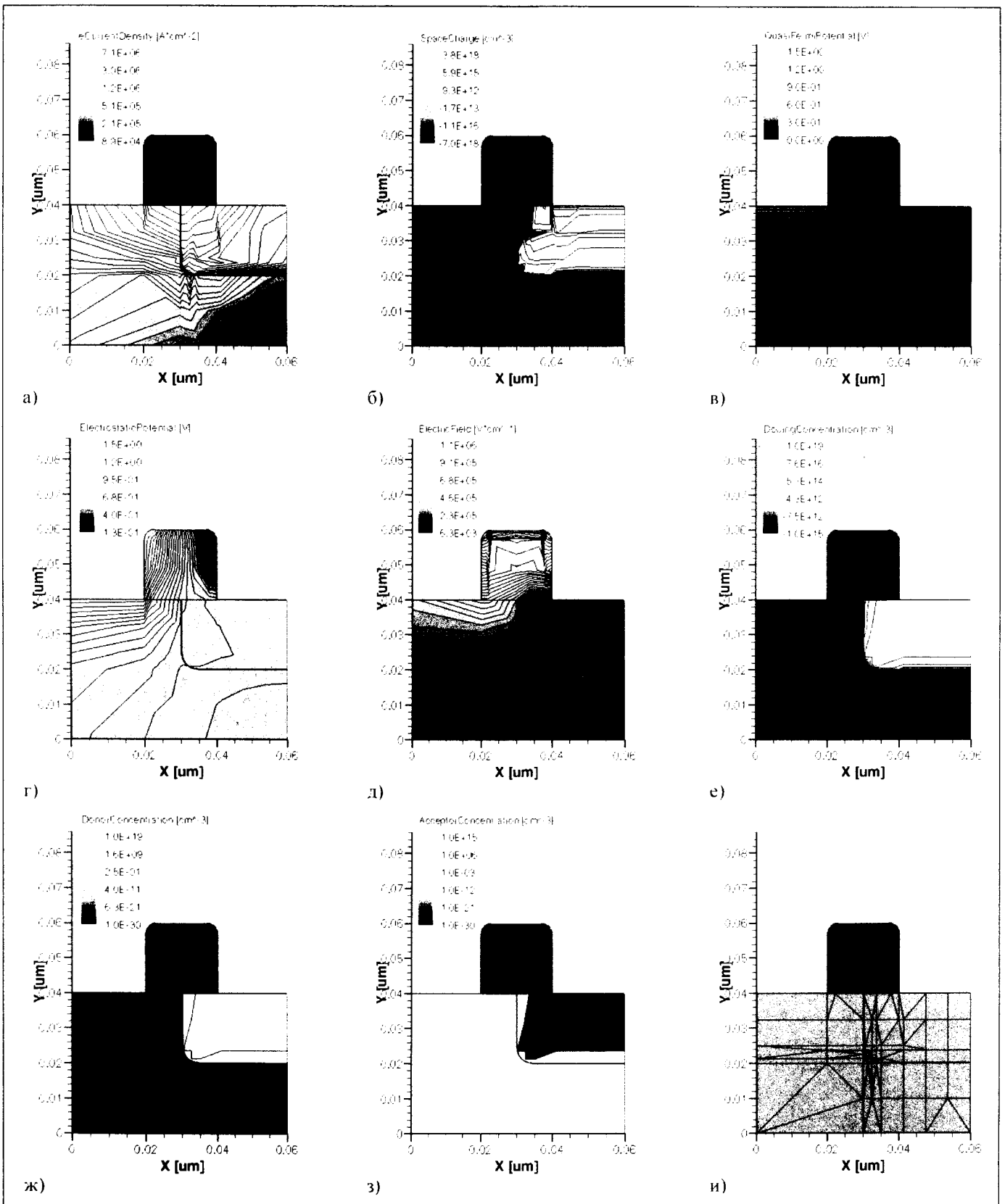


Рис. 5. Результаты моделирования (продолжение) в сечении внутреннего р-п перехода для следующих функций: а) плотность тока электронов; б) пространственный заряд; в) квазипотенциал Ферми; г) электростатический потенциал; д) напряженность электрического поля; е) концентрация носителей; ж) концентрация доноров; з) концентрация акцепторов; и) на этом рисунке повторена сетка и система узлов, в которых рассчитывались 17 вышеперечисленных функций

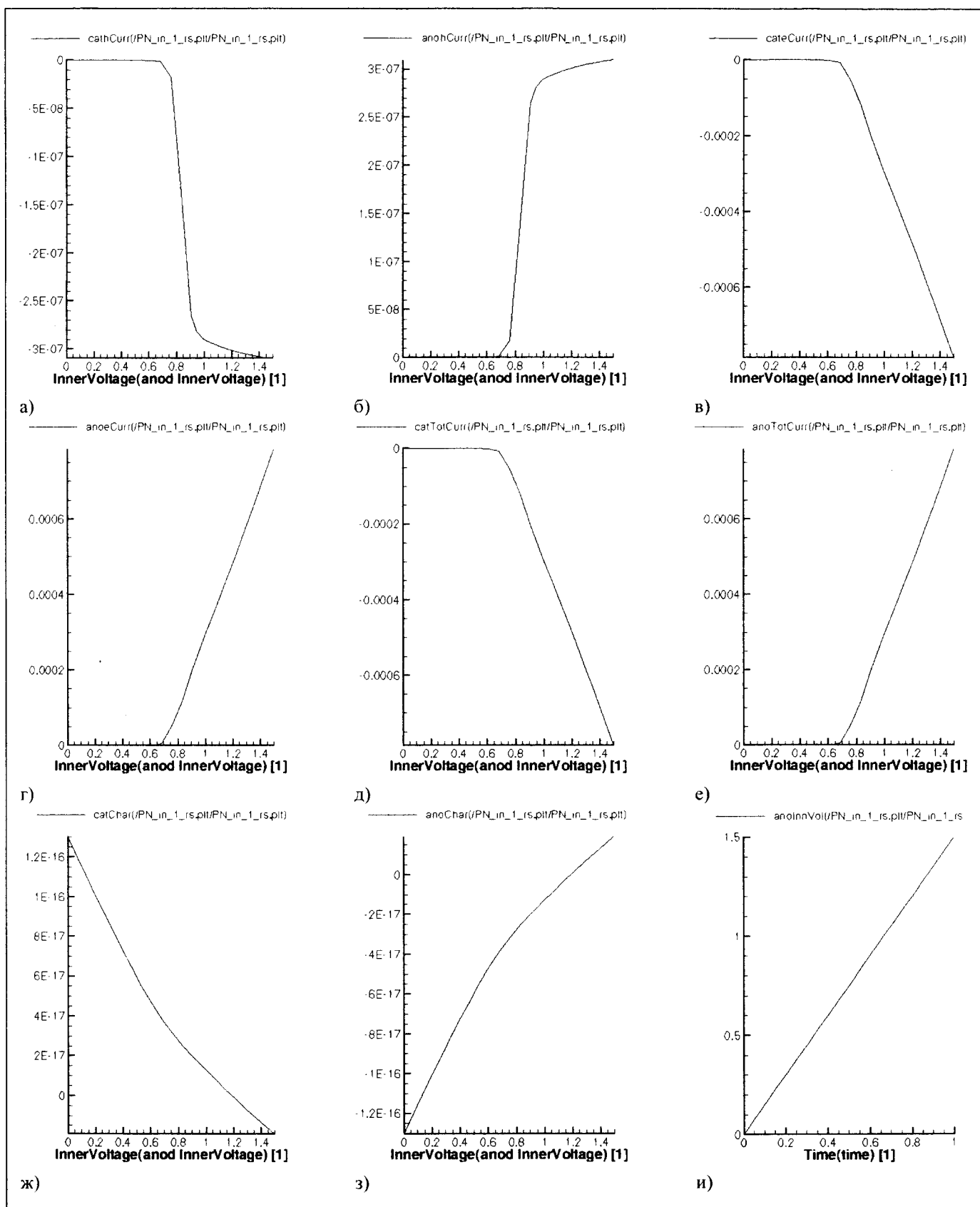


Рис. 6. Графики функций для внутреннего p-n перехода в зависимости от входного (на аноде) напряжения: а) ток дырок в области катода; б) ток дырок в области анода; в) ток электронов в области катода; г) ток электронов в области анода; д) общий ток в области катода; е) общий ток в области анода; ж) заряд в области катода; з) заряд в области анода; и) функция входного напряжения (на аноде) от времени

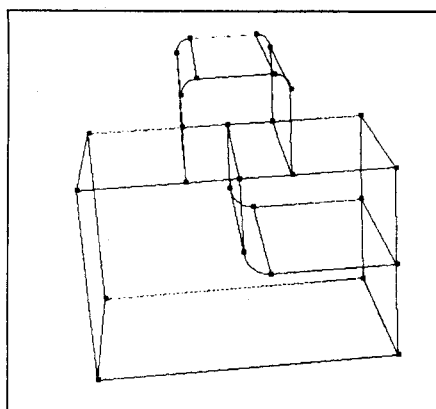


Рис. 7. Определение 3D структуры внутреннего р-п перехода (процедура Extrude)

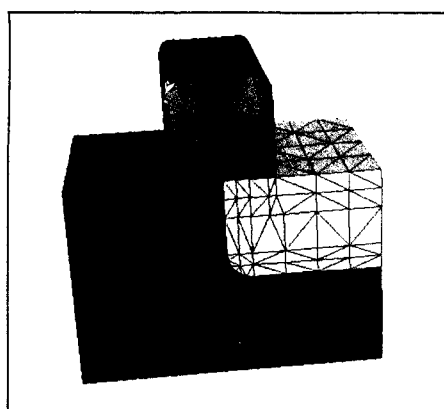


Рис. 8. Назначение материалов для 3D структуры внутреннего р-п перехода и задание сетки

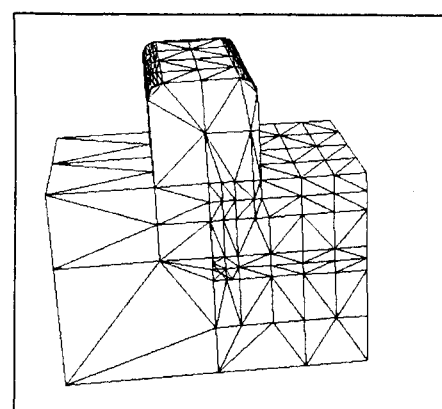


Рис. 9. Расчетная сетка для 3D моделирования внутреннего р-п перехода

На рис. 7 определена 3D структура внутреннего р-п перехода. Она получена в результате применения процедуры Extrude для сечения перехода, изображенного на рис. 1. Сечению добавляется третье измерение и задается длина $L_z = 40$ нм (таблица 2).

При переходе от 2D к 3D моделированию сохраняются старые назначения концентраций областей и параметры расчетной сетки.

На рис. 8. показано назначение материалов для 3D структуры внутреннего р-п перехода, на рис. 9 – расчетная сетка для 3D моделирования внутреннего р-п перехода. Диапазон изменения расчетной сетки остался прежним (2,5 – 10 нм). Время моделирования составило 65 секунд.

На рис. 10 представлены результаты 3D моделирования внутреннего р-п перехода для следующих функций: а) скорость дырок; б) квазипотенциал Ферми для дырок; в) подвижность дырок; г) плотность дырок; д) плотность тока дырок; е) скорость электронов; ж) квазипотенциал Ферми для электронов; з) подвижность электронов; и) плотность электронов.

На рис. 11 представлены результаты 3D моделирования внутреннего р-п перехода для следующих функций: а) плотность тока электронов; б) пространственный заряд; в) квазипотенциал Ферми; г) электростатический потенциал; д) напряженность электрического поля; е) концентрация носителей; ж) концентрация доноров; з) концентрация акцепторов; и) на этом рисунке повторена сетка и система узлов, в которых рассчитывались 17 вышеперечисленных функций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шуленбург М. Нанотехнологии. Новинки завтрашнего дня: Европейская Комиссия, Генеральный директорат по научным исследованиям, 2006.
2. Суздальев И.П. Нанотехнология: Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов.

Таблица 2. Топологические размеры для моделирования 3D структуры внутреннего р-п перехода

	p1	n2	ox	anode	cathode
Ширина W_x (нм)	60	30	20	20	20
Высота H_y (нм)	40	20	20	20	20
Длина L_z (нм)	40	40	40	40	40

Изд. 2-е, испр. – М.: Книжный дом «Либроком», 2009. 592 с.

3. Нанотехнологический портал VDI-TZ www.nanonet.de
4. Европейский Нанотехнологический Портал www.nanoforum.org
5. Нанотехнологические новости и дискуссии www.nano-invests.de
6. Трубочкина Н.К. Переходная 3D наносхемотехника – новая концепция и новое качество в создании трехмерных интегральных схем // Качество. Инновации. Образование. 2009. №4.
7. Трубочкина Н.К. Синтез на ЭВМ функционально-интегрированных элементов // Вопросы радиоэлектроники, сер. Технология производства и оборудование, вып.1. 1985. С.20.
8. Трубочкина Н.К. Логические элементы статических БИС. – М.: МИЭМ, 1987.
9. Трубочкина Н.К. Машинное моделирование функционально-интегрированных элементов: Учебное пособие. – М.: МИЭМ, 1989.
10. Трубочкина Н.К., Мурашев В.Н., Петросян Ю.А., Алексеев А.Е. Функциональная интеграция. Концепция // Электронная промышленность. 2000. № 4. С.49-70.
11. Трубочкина Н.К., Мурашев В.Н., Петросян Ю.А., Алексеев А.Е. Функциональная интеграция элементов и устройств // Электронная промышленность. 2000. № 4. С.70-88.

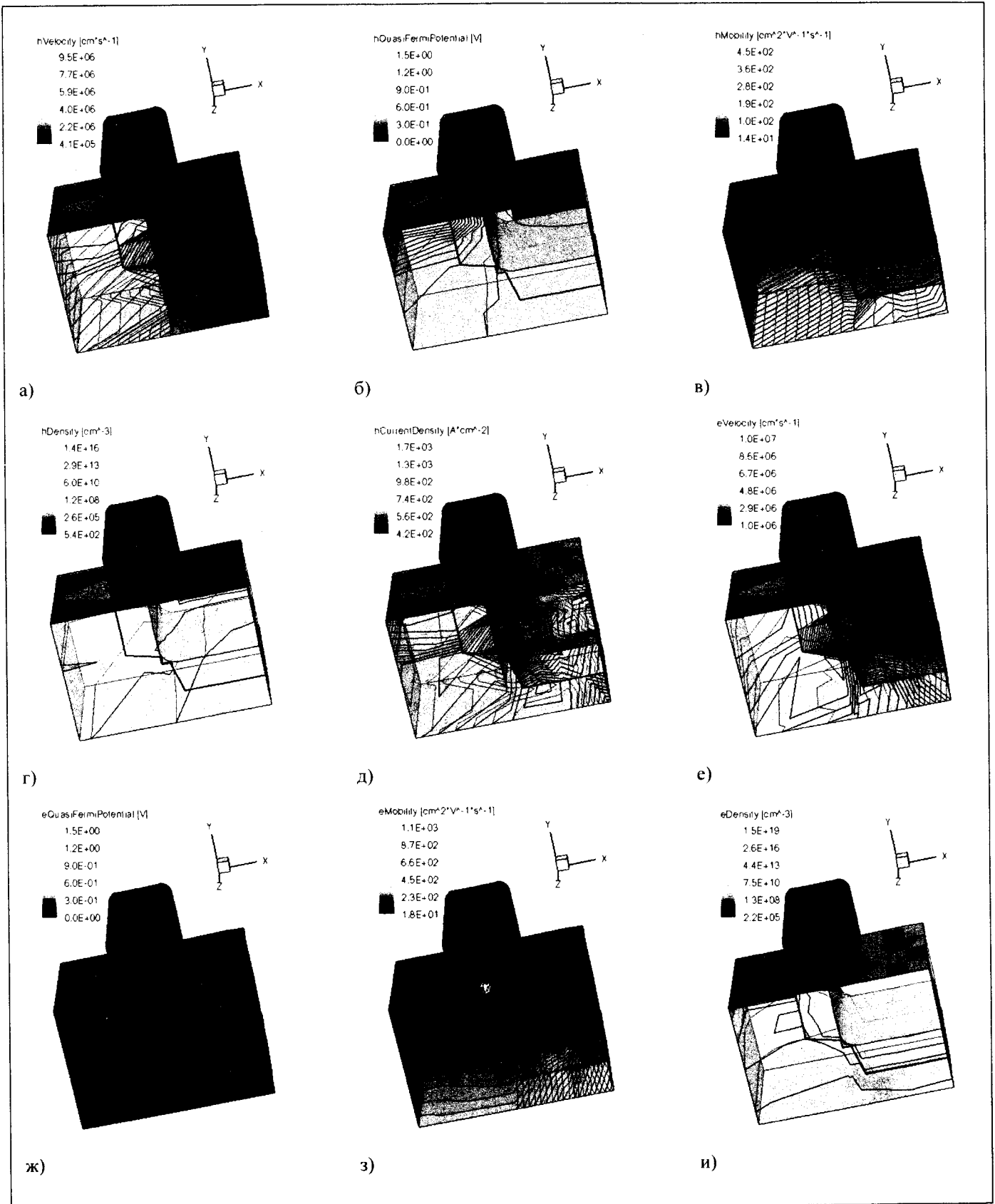
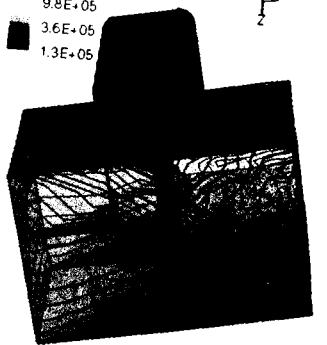


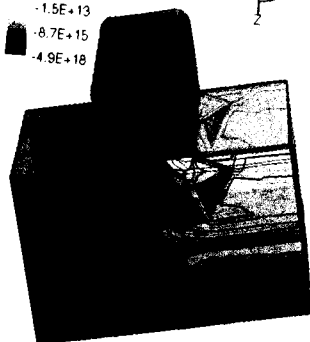
Рис. 10. Результаты моделирования 3D структуры внутреннего p-n перехода для следующих функций: а) скорость дырок; б) квазипотенциал Ферми для дырок; в) подвижность дырок; г) плотность дырок; д) плотность тока дырок; е) скорость электронов; ж) квазипотенциал Ферми для электронов; з) подвижность электронов; и) плотность электронов

eCurrentDensity [$A \cdot cm^{-2}$]
 1.9E+07
 7.1E+06
 2.6E+06
 9.8E+05
 3.6E+05
 1.3E+05



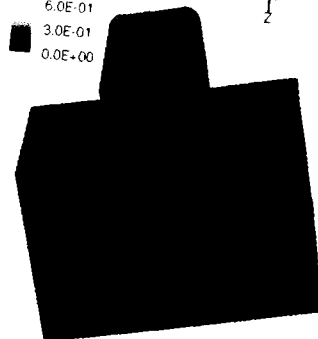
а)

SpaceCharge [cm^{-3}]
 3.0E+18
 5.3E+15
 9.2E+12
 -1.5E+13
 -8.7E+15
 -4.9E+18



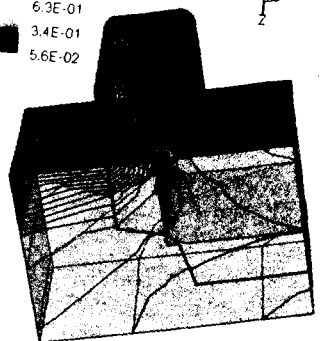
б)

QuasiFermiPotential [V]
 1.5E+00
 1.2E+00
 9.0E-01
 6.0E-01
 3.0E-01
 0.0E+00



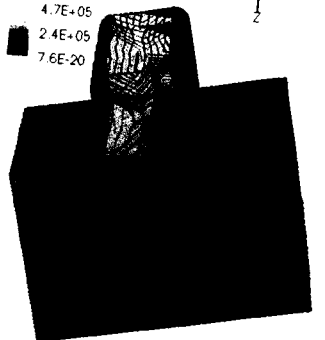
в)

ElectrostaticPotential [V]
 1.5E+00
 1.2E+00
 9.2E-01
 6.3E-01
 3.4E-01
 5.6E-02



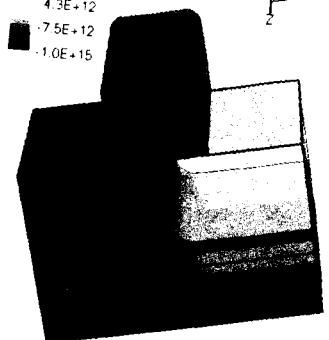
г)

ElectricField [$V \cdot cm^{-1}$]
 1.2E+06
 9.5E+05
 7.1E+05
 4.7E+05
 2.4E+05
 7.6E+20



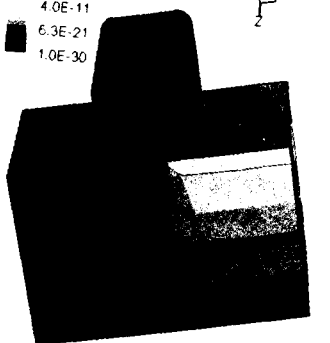
д)

DopingConcentration [cm^{-3}]
 1.0E+19
 7.6E+16
 5.7E+14
 4.3E+12
 -7.5E+12
 -1.0E+15



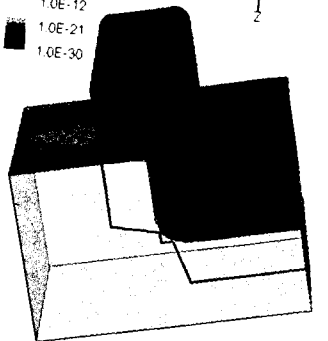
е)

DonorConcentration [cm^{-3}]
 1.0E+19
 1.6E+09
 2.5E-01
 4.0E-11
 6.3E-21
 1.0E-30



ж)

AcceptorConcentration [cm^{-3}]
 1.0E+15
 1.0E+06
 1.0E-03
 1.0E-12
 1.0E-21
 1.0E-30



з)

и)

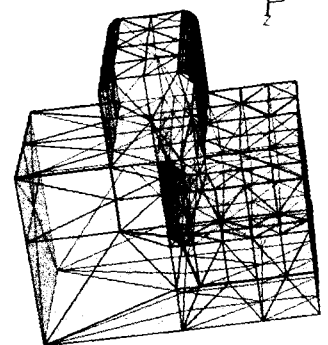


Рис. 11. Результаты моделирования (продолжение) 3D структуры внутреннего р-п перехода для следующих функций: а) плотность тока электронов; б) пространственный заряд; в) квазипотенциал Ферми; г) электростатический потенциал; д) напряженность электрического поля; е) концентрация носителей; ж) концентрация доноров; з) концентрация акцепторов; и) на этом рисунке повторена сетка и система узлов, в которых рассчитывались 17 вышеперечисленных функций

12. Трубочкина Н.К. Схемотехника ЭВМ. – М.: МИ-ЭМ, 2008. 256с.
13. Карасев В.А., Лучинин В.В. Введение в конструирование бионических наносистем. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 464 с.
14. Sentaurus Device. Synopsys. Version 2008. Tutorial. pp. 163- 757. Registered Trademarks (®)Synopsys www.synopsys.com/Tools/TCAD/Pages/default.aspx
15. Фейнман Р. Моделирование физики на компьютерах // Квантовый компьютер и квантовые вычисления: Сб. в 2-х т. Т. 2. – Ижевск: РХД, 1999.

(Окончание статьи будет опубликовано в № 6.)

*Надежда Константиновна Трубочкина,
д-р техн. наук, профессор МГИЭМ.
e-mail: nadin@miem.edu.ru*

О.Ю. Ерёмин

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ART-1 ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА РАСПОЗНАВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В работе рассматриваются вопросы кластеризации элементов изображений на снимках паяных соединений печатных плат при автоматическом рентгеновском контроле. Рассматриваются проблемы адаптивной автоматической классификации с использованием нейросетевой модели адаптивно-резонансной теории ART-1. Предлагается метод повышения качества кластеризации на основе обработки изображения алгоритмом ART-1 в два прохода.

Ключевые слова: автоматический рентгеновский контроль, печатная плата, паяное соединение, искусственная нейронная сеть, адаптивно-резонансная теория, кластеризация, адаптивная классификация

O.Yu. Eremin

MODIFIED ART-1 ALGORITHM TO IMPROVE RECOGNITION OF DEFECTS IN SOLDERED JOINTS OF PRINTED CIRCUIT BOARDS

The article is concerned with pixel clusterization on printed circuit board images in automatic x-ray inspection. The article deals with the problems of adaptive automatic classification by means of ART-1 neural network model. The method of improving clusterization quality founded on two-way image processing by ART-1 is suggested.

Keywords: automatic x-ray inspection, printed circuit board, solder connection, artificial neural network, adaptive-resonance theory, clusterization, adaptive classification

Введение

Повышение требований к радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) заставляет производителей вносить существенные изменения в технологический процесс производства печатных плат [1]. Так вполне естественным на сегодняшний день является повышение уровня автоматизации на всех этапах жизненного цикла изделий радиоэлектронной промышленности. Внедрение CALS-технологий позволяет повышать качество и надежность РЭА, а также уменьшает время, затрачиваемое разработчиками от появления идеи до получения первого образца изделия, и дальнейшего его внедрения в серийное производство [2].

Помимо интеграции и автоматизации процессов, необходимо также внедрять системы контроля: от входного контроля электронных компонентов до контроля готового изделия [3]. Для контроля гото-

вого изделия вполне успешно используются системы автоматического оптического контроля (АОК, AOI – Automatic Optical Inspection), в системе распознавания образов которых хорошо себя зарекомендовали нейросетевые технологии. Система АОК выделяет для оператора области на изображении печатной платы, где с достаточно высокой долей вероятности может быть обнаружен дефект, а затем уже оператор принимает решение, есть ли дефект на самом деле или произошло ложное обнаружение. Но так как плотность монтажа компонентов на печатной плате постоянно повышается, то стали использоваться корпуса с выводами в виде шариков (например, BGA – Ball Grid Array). Расположение выводов под корпусом микросхемы не позволяет использовать оптический контроль для анализа паяных соединений. Поэтому на рынке появились системы автоматического рентгеновского контроля