

**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

**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

*Начало статьи опубликовано в №5 журнала.*

**2D моделирование поверхностного p-n перехода с минимальным топологическим размером 20 нм и электрическим воздействием на электроды (pn)**

На рис. 12-14 показаны этапы подготовки данных для 2D моделирования поверхностного p-n перехода (pn).

На рис. 12 определена 2D конструкция (сечение) поверхностного p-n перехода. Физическому p-n переходу соответствует линия ef, находящаяся на поверхности основного материала полупроводника. Наличие проводников, через которые осуществляется электрическое воздействие на полупроводниковые области, определяется заданием топологии и свойств контактов. Так, линия abcd, линия соприкосновения проводника с остальной конструкцией, соответствует контакту анода (anode), линия gi – контакту катода (cathode).

На рис. 13. определены материалы для поверхностного p-n перехода: область p1 – область кремния p-типа (область с дырочной проводимостью), область n2 – область кремния n-типа (область с электронной проводимостью), ox – изолирующий окисел SiO<sub>2</sub>.

На этом же этапе задаются концентрации носителей в областях интегральной структуры внутреннего

p-n перехода.

Как и у внутреннего перехода, зададим концентрацию дырок в области p1 – 10<sup>15</sup> носителей/см<sup>3</sup>, а концентрацию электронов в области n2 – 10<sup>19</sup> носителей/см<sup>3</sup>.

Исходя из сечения и минимального топологического размера в 20 нм определяем размеры областей. Они представлены значениями в таблице 3.

На рис. 14 показана расчетная сетка для 2D моделирования по сечению поверхностного p-n перехода. На рисунке видно, что более густая сетка в области самого перехода, области p1, а также в областях мелкомасштабных изменений структуры, в частности, в областях стравленного окисла.

После задания топологических данных расчет и моделирование осуществляется по схеме, рассмотренной выше. Результаты 2D моделирования поверхностного p-n перехода представлены на рис 15, 16.

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

На рис. 17-19 показаны этапы подготовки данных для 3D моделирования поверхностного p-n перехода

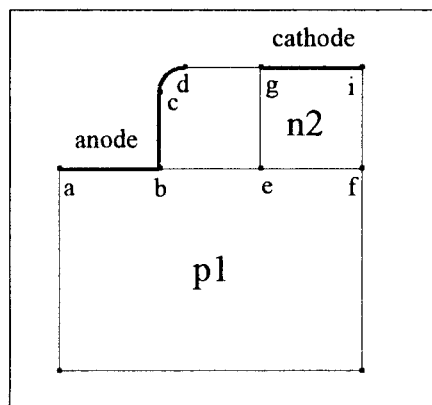


Рис. 12. Определение 2D конструкции (сечения) поверхностного p-n перехода

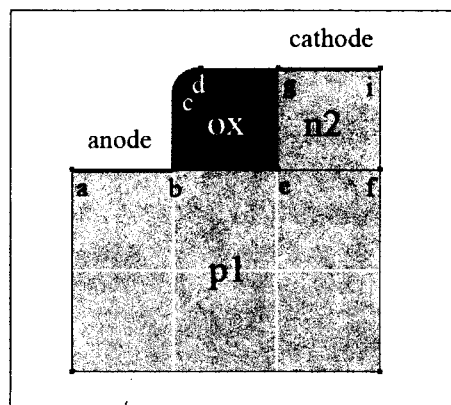


Рис. 13. Назначение материалов поверхностного p-n перехода

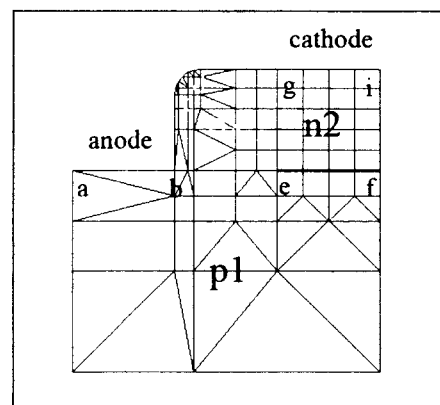


Рис. 14. Задание сетки для 2D моделирования по сечению поверхностно-го p-n перехода

Таблица 3. Топологические размеры для моделирования поверхностного p-n перехода

	p1	n2	ox	anode	cathode
Ширина $W_x$ (нм)	60	20	20	20	20
Высота $H_y$ (нм)	40	20	20	20	-

Таблица 4. Топологические размеры для моделирования 3D структуры поверхностного p-n перехода

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

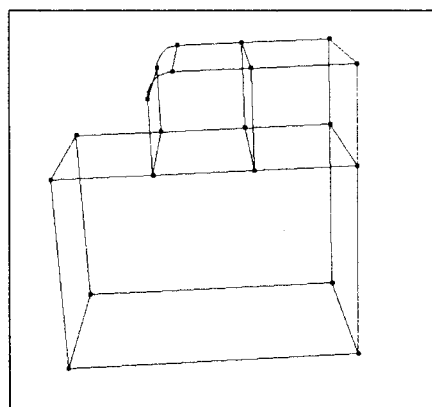


Рис. 17. Определение 3D структуры поверхностного p-n перехода (процедура Extrude)

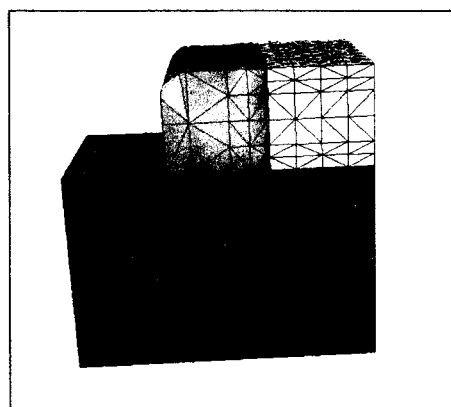


Рис. 18. Назначение материалов для 3D структуры поверхностного p-n перехода и задание сетки

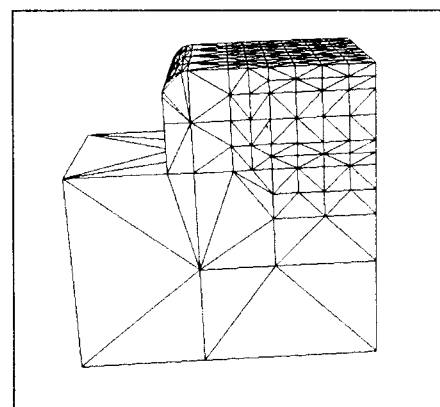


Рис. 19. Расчетная сетка для 3D моделирования поверхностного p-n перехода

(рп).

На рис. 17 определена 3D структура поверхностного p-n перехода. Она также получена в результате применения процедуры Extrude для сечения перехода, изображенного на рис. 12. Сечению добавлено третье измерение и задается длина  $L_z = 40$  нм (таблица 4).

На рис. 18 показано назначение материалов для

3D структуры поверхностного p-n перехода, на рис. 19 – расчетная сетка для 3D моделирования поверхностного p-n перехода. Диапазон изменения расчетной сетки остался прежним (2,5 – 10 нм).

На рис. 20 представлены результаты 3D моделирования поверхностного p-n перехода для следующих функций: а) скорость дырок; б) квазипотенци-

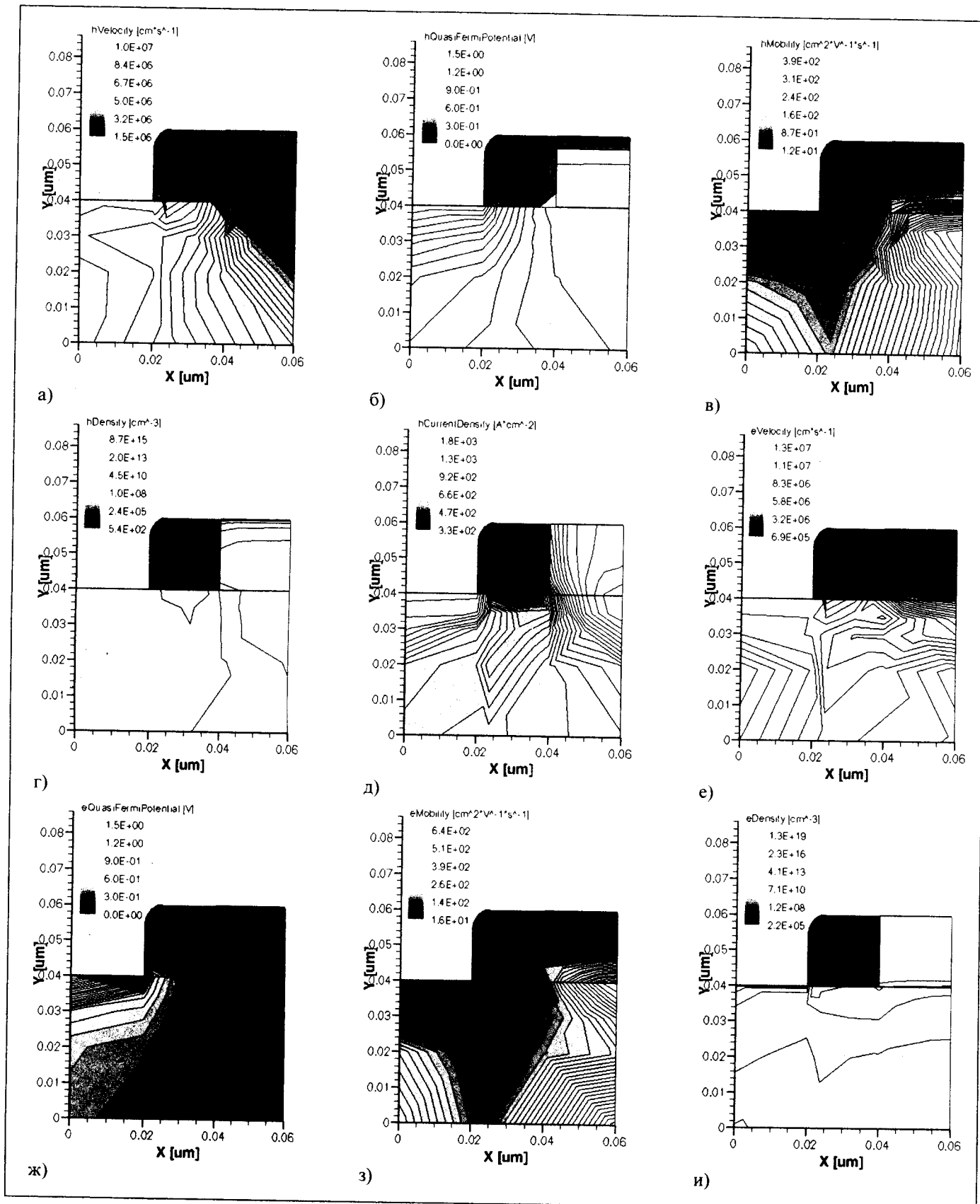


Рис. 15. Результаты моделирования в сечении внутреннего р-п перехода для следующих функций: а) скорость дырок; б) квазипотенциал Ферми для дырок; в) подвижность дырок; г) плотность дырок; д) плотность тока дырок; е) скорость электронов; ж) квазипотенциал Ферми для электронов; з) подвижность электронов; и) плотность электронов

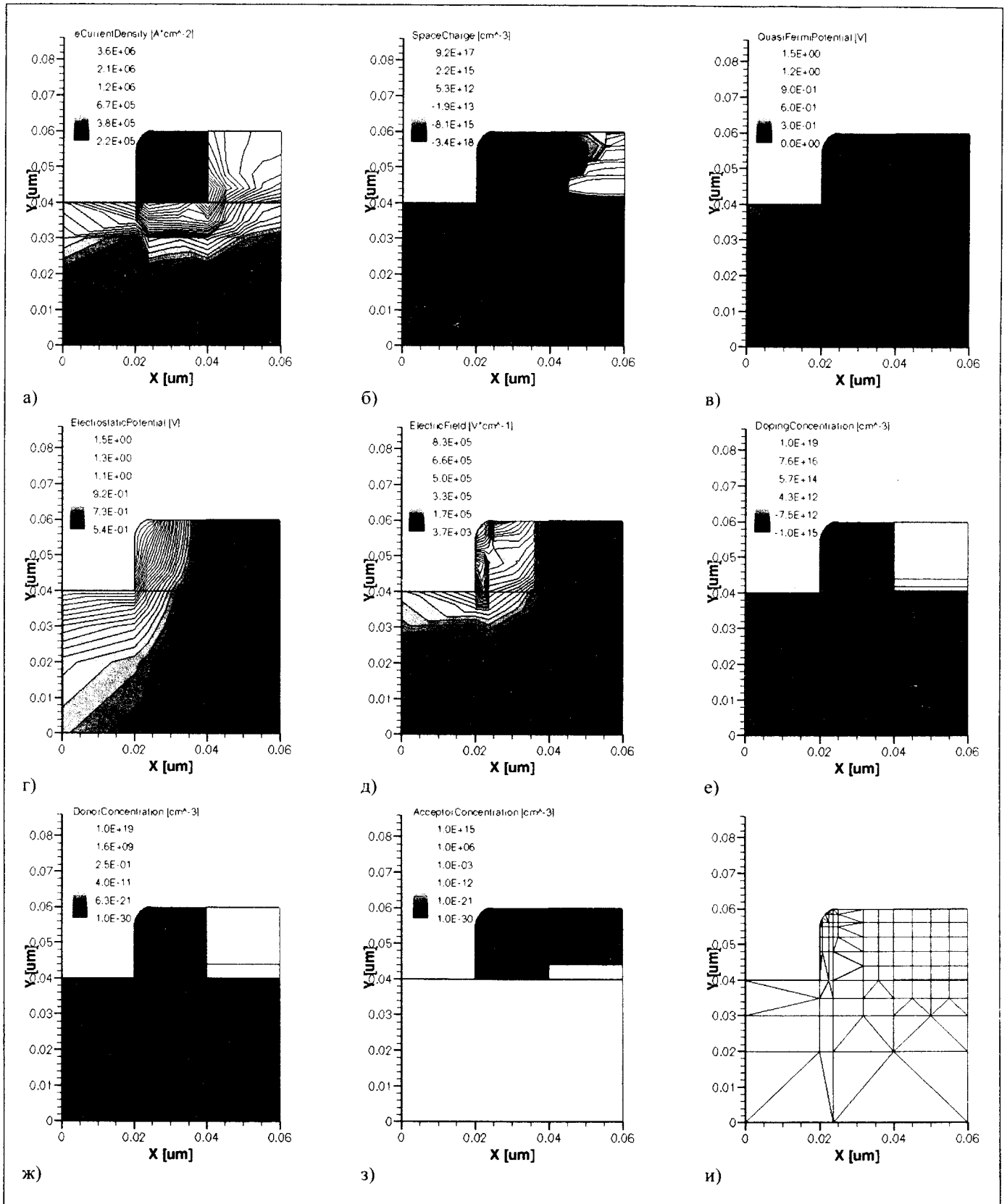


Рис. 16. Результаты моделирования (продолжение) в сечении внутреннего p-n перехода для следующих функций: а) плотность тока электронов; б) пространственный заряд; в) квазипотенциал Ферми; г) электростатический потенциал; д) напряженность электрического поля; е) концентрация носителей; ж) концентрация доноров; з) концентрация акцепторов; и) на этом рисунке повторена сетка и система узлов, в которых рассчитывались 17 вышеперечисленных функций

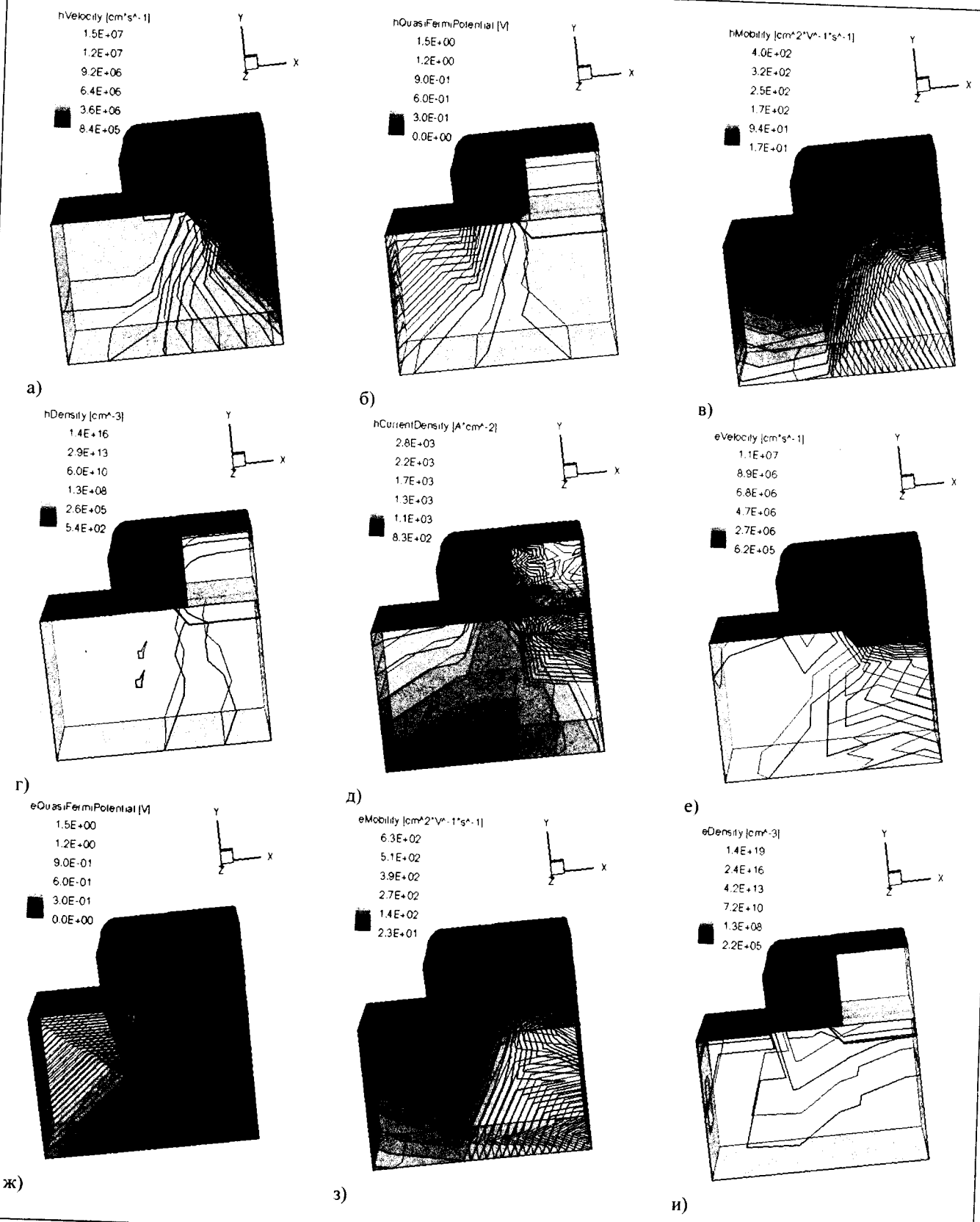


Рис. 20. Результаты моделирования 3D структуры поверхностного p-n перехода для следующих функций: а) скорость дырок; б) квазипотенциал Ферми для дырок; в) подвижность дырок; г) плотность дырок; д) плотность тока дырок; е) скорость электронов; ж) квазипотенциал Ферми для электронов; з) подвижность электронов; и) плотность электронов

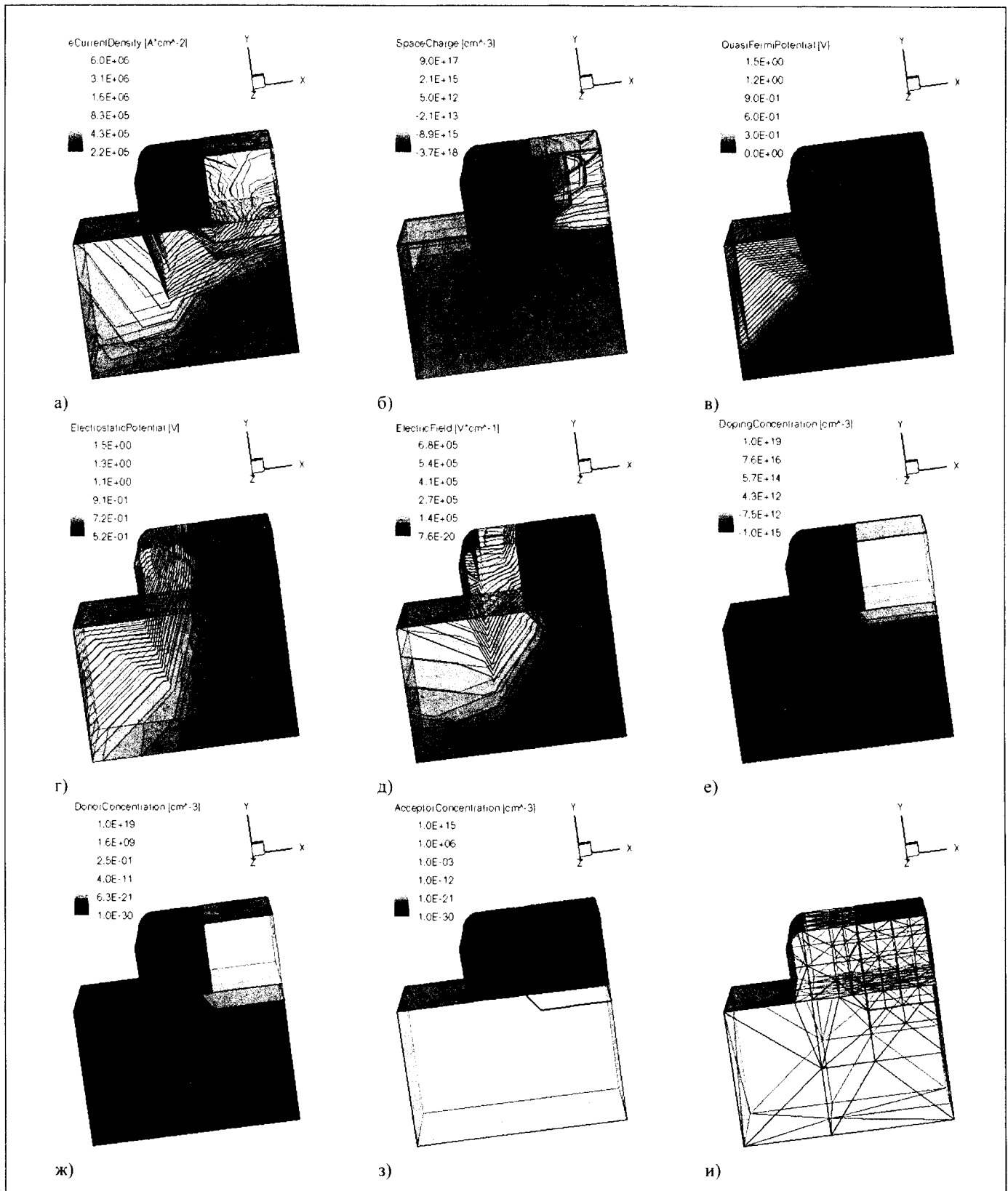


Рис. 21. Результаты моделирования (продолжение) 3D структуры поверхностного p-n перехода для следующих функций: а) плотность тока электронов; б) пространственный заряд; в) квазипотенциал Ферми; г) электростатический потенциал; д) напряженность электрического поля; е) концентрация носителей; ж) концентрация доноров; з) концентрация акцепторов; и) на этом рисунке повторена сетка и система узлов, в которых рассчитывались 17 вышеперечисленных функций

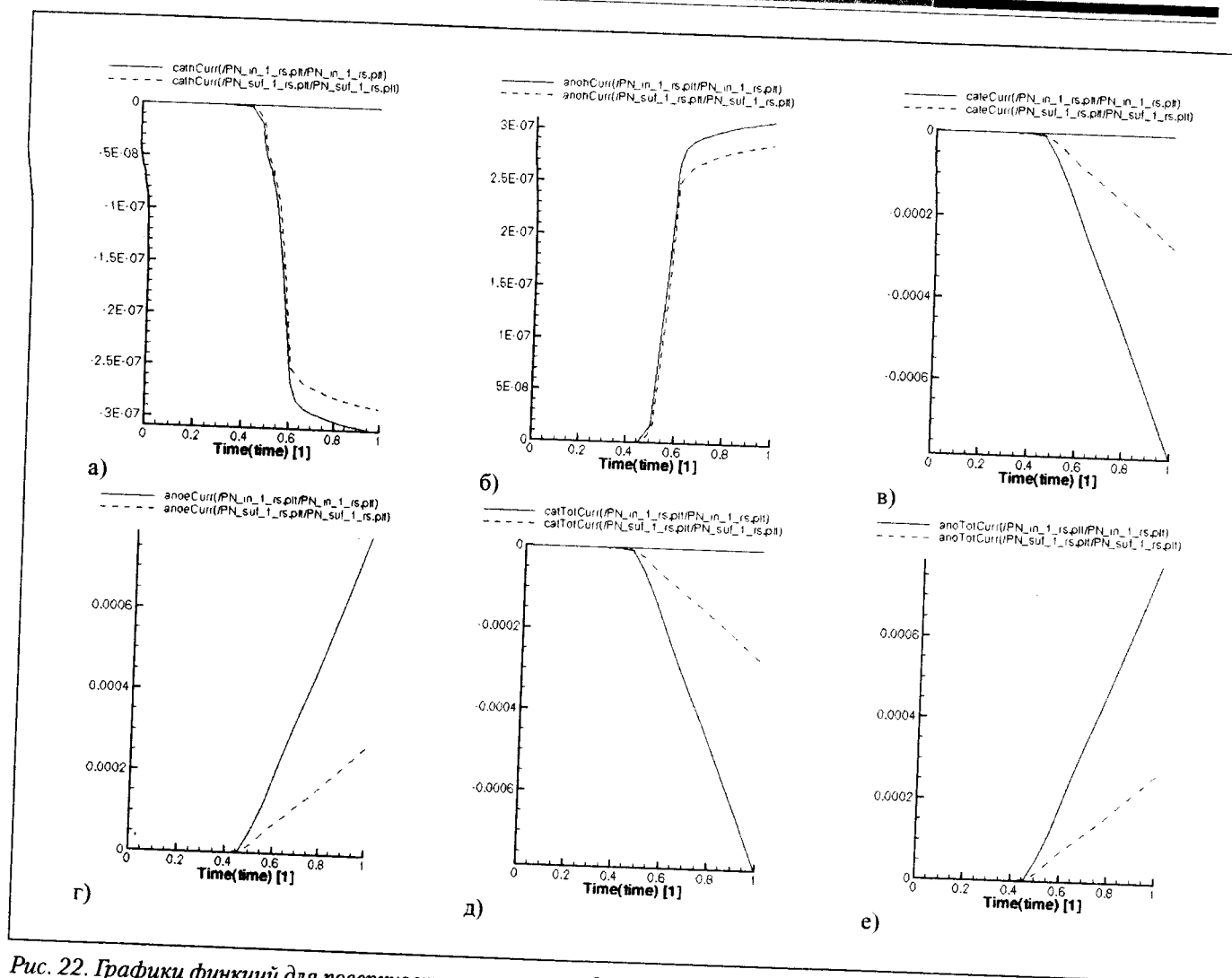


Рис. 22. Графики функций для поверхностного p-n перехода (штрих пунктирная линия) в зависимости от входного (на аноде) напряжения: а) ток дырок в области катода; б) ток дырок в области анода; в) ток электронов в области катода; г) ток электронов в области анода; д) общий ток в области катода; е) общий ток в области анода (все гра-фики даны в сравнении с аналогичными графиками внутреннего p-n перехода (сплошная линия))

ал 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. 22 представлены результаты 3D моделирования поверхностного 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 рисунках видны изолинии. Изолиния – это линия с одинаковым значением моделируемой функции.

### Сравнительный анализ токовых характеристик внутреннего и поверхностного p-n переходов

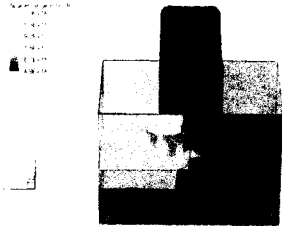
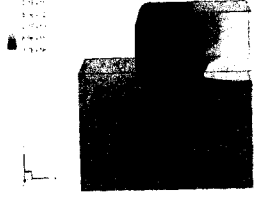
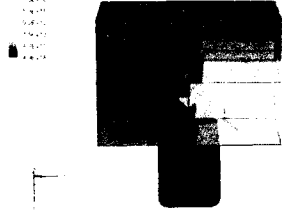
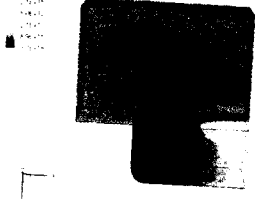
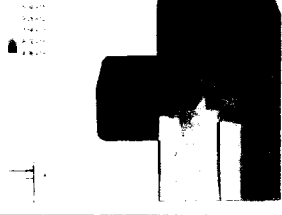
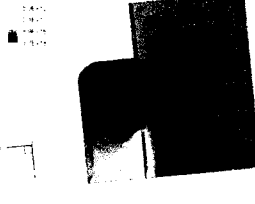
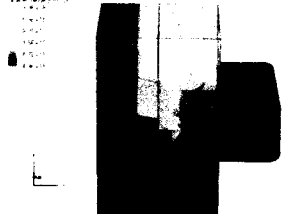
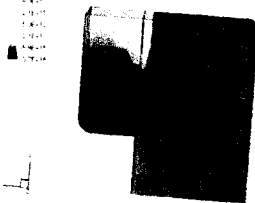
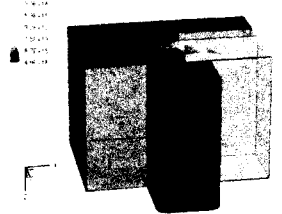
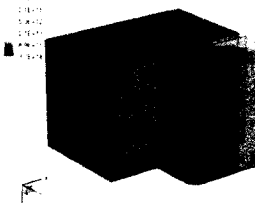
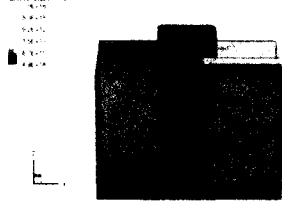
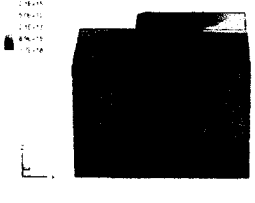
На рис. 22 приведен сравнительный анализ токовых характеристик внутреннего и поверхностного p-n переходов.

Видно, что ток дырок в области катода, ток дырок в области анода, ток электронов в области катода, ток электронов в области анода, общий ток в области катода и общий ток в области анода у поверхностного p-n перехода меньше, чем у внутреннего.

Т.е. при синтезе малоомощных наноструктур, выполняющих логические и запоминающие функции, следует отдавать предпочтение структурам с поверхностными переходами.

### Технологическая реализуемость различных пространственных реализаций внутреннего и поверхностного p-n переходов

Таблица 5. Пространственные реализации внутреннего и поверхностного p-n переходов

p → n		p ⇒ n	
YXZ			
	Эпитаксиально-планарная технология		Локальная эпитаксия
	Реализуется		Реализуется
-YZX			
	Требуются новые технологии выращивания полупроводника на металлах и окислах		Требуются новые технологии выращивания полупроводника на металлах и окислах
-XYZ			
	Сложная реализация		Реализуется
XZY			
	Сложная реализация		Требуются новые технологии выращивания полупроводника на окислах
-ZXY			
	На диэлектрической подложке		На диэлектрической подложке
	Реализуется		Реализуется
ZYX			
	На диэлектрической подложке		На диэлектрической подложке
	Реализуется		Реализуется



В таблице 5 представлены пространственные реализации внутреннего и поверхностного p-n переходов, которые необходимо учитывать при синтезе новых переходовых 3D логических и запоминающих элементов для 3D СБИС.

Как видно из таблицы, некоторые варианты могут быть сделаны по стандартным технологиям, для некоторых требуется усложненная, но все же реальная технология, а некоторые, в силу современных технологических особенностей, пока не могут быть реализованы и диктуют необходимость разработки новых соответствующих технологий.

### Заключение

Для наноструктур внутреннего и поверхностного p-n переходов с минимальным топологическим размером 20 нм проведено физическое 2D и 3D моделирование следующих характеристик: скорость дырок, квазипотенциал Ферми для дырок, подвижность дырок, плотность дырок, плотность тока дырок, скорость электронов, квазипотенциал Ферми для электронов, подвижность электронов, плотность электронов, плотность тока электронов, пространственный заряд, квазипотенциал Ферми, электростатический потенциал, напряженность электрического поля, концентрация носителей, концентрация доноров, концентрация акцепторов, ток дырок в области катода, ток дырок в области анода, ток электронов в области катода, ток электронов в области анода, общий ток в области катода, общий ток в области анода, заряд в области катода, заряд в области анода.

Подтверждено наличие барьерной функции у обоих типов p-n перехода (рис. 6е).

На основе физического моделирования проведен качественный анализ двух типов p-n переходов. Сделан вывод о том, что поверхностный p-n переход при тех же параметрах концентрации в подобных областях работает на меньших токах (рис. 22), что делает его более предпочтительным для синтеза наноструктур логических и запоминающих элементов переходной схемотехники.

Дано заключение о технологической реализуемости различных пространственных реализаций внутреннего и поверхностного p-n переходов.

Данное исследование является основой для дальнейшего синтеза и моделирования наноструктур логических элементов и элементов памяти переходной схемотехники для 3D СБИС с максимальной информационной плотностью при минимальном топологическом размере 20 нм.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шуленбург М. Нанотехнологии. Новинки завтрашнего дня: Европейская Комиссия, Генеральный директорат по научным исследованиям, 2006.
2. Суздаев И.П. Нанотехнология: Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. Изд. 2-е, испр. – М.: Книжный дом «Либроком», 2009. 592 с.
3. Нанотехнологический портал VDI-TZ
4. Европейский Нанотехнологический Портал
5. Нанотехнологические новости и дискуссии
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.
12. Трубочкина Н.К. Схемотехника ЭВМ. – М: МИЭМ, 2008. 256с.
13. Карасев В.А., Лучинин В.В. Введение в конструирование бионических наносистем. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 464 с.
14. Setaurus Device. Synopsys. Version 2008. Tutorial. PP. 163- 757. Registered Trademarks (®)Synopsys
15. Фейнман Р. Моделирование физики на компьютерах // Квантовый компьютер и квантовые вычисления: Сб. в 2-х т. – Ижевск: РХД, 1999. Т.2. С. 96–123.

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