

Н.К. Трубочкина

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННО НОВОЙ 3D НАНО- СТРУКТУРЫ КМОП ИНВЕРТОРА С ПРОЕКТНОЙ НОРМОЙ 20 НМ - ОСНОВЫ НОВОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ СБИС

В статье рассматривается результат разработки нового вертикального КМОП инвертора, объединяющего достоинства КМОП-схемотехники (минимальная потребляемая мощность) и достоинства вертикальной интеграции вычислительных систем (предельная информационная плотность).

Ключевые слова: разработка (синтез и компьютерное моделирование) велась в диапазоне технологических норм 20 нм, что опережает развитие современной нанoeлектроники.

Одличительной особенностью КМОП схем по сравнению с биполярными является малое энергопотребление в статическом режиме. Из-за наличия в них как *p*-, так и *r*-канальных полевых транзисторов они обладают более высоким быстродействием и меньшим энергопотреблением, чем лидеры СБИС МОП схемы, однако при этом характеризуются более сложным технологическим процессом изготовления и меньшей плотностью упаковки. С повышением степени интеграции микросхем появилась проблема рассеивания энергии в них. В результате сравнения КМОП схемотехника оказалась лучшей с этой точки зрения. Со временем были достигнуты скорость переключения и плотность монтажа, недостижимые в технологиях, основанных на биполярных транзисторах. Требования к информационной плотности КМОП схем постоянно растут и поэтому требуются новые технические решения для СБИС нового поколения. В статье рассмотрены этапы разработки новой вертикальной КМОП наноструктуры инвертора с повышенной информационной плотностью, включающие в себя синтез математической модели, генерацию по ней наноструктуры и компьютерное моделирование характеристик физической структуры инвертора с целью определения области работоспособности.

N.K. Trubochkina

DEVELOPMENT AND SIMULATION OF A NEW HIGH QUALITY 3D CMOS INVERTER NANOSTRUCTURE WITH DESIGN RULE 20 NM - FOUNDATIONS OF A NEW ELEMENT BASE ENERGY-SAVING VLSI

The article discusses the result of the development of new vertical CMOS inverter that combines both CMOS - circuitry (minimum power consumption) and the advantages of vertical integration of computer systems (information density maximum).

Keywords: development (synthesis and computer simulation) was conducted in a range of technological norms of 20 nm, which outstrips the development of modern nanoelectronics

Синтез математической модели КМОП инвертора в переходной схемотехнике

На рис. 1 представлено уравнение синтеза математической модели КМОП инвертора в переходной схемотехнике.

Исходными моделями для синтеза являются модели *p*-канального и *r*-канального МОП транзисторов в переходной схемотехнике. При использовании обычного принципа функциональной интеграции получается модель, содержащая шесть полупроводниковых и две изолирующих (окисных) областей.

Пространственные реализации КМОП инвертора в переходной схемотехнике

Результат синтеза – модель размерностью $N=8$ (рис. 1) имеет $4^8=65536$ пространственных реализаций, описываемых структурными формулами, одна из которых представлена на рис. 2а. Она соответствует классической структуре КМОП инвертора, выполненного в эпитаксиально-планарной технологии. Если же объединить области тонких окислов ox_7 и ox_8 , имеющие одинаковый потенциал, получим модель размерностью $N=7$, имеющую $4^7=16384$ пространственных реализации. Одна из таких структурных формул изображена на рис. 2б.

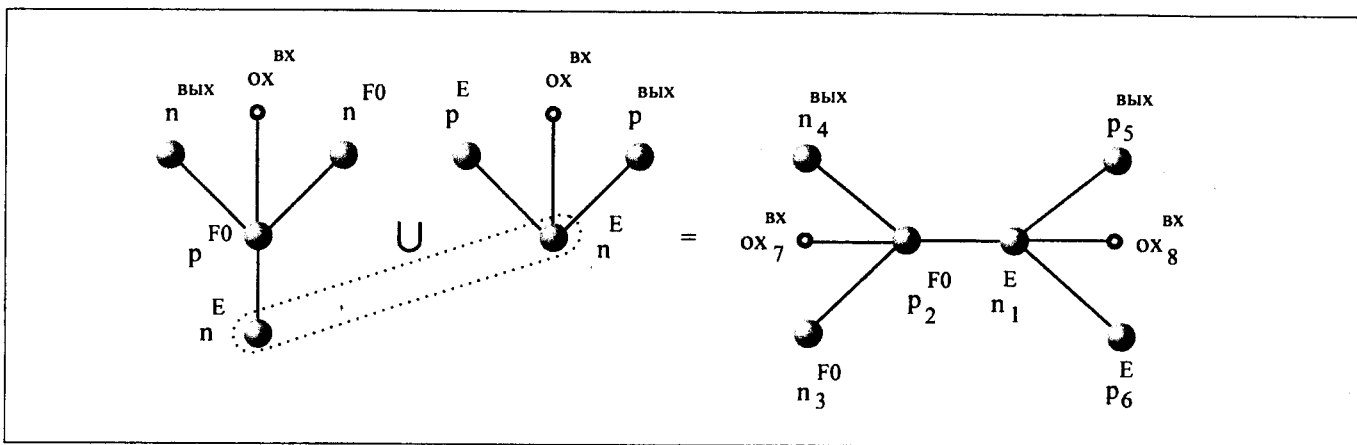


Рис. 1. Уравнение синтеза переходной модели КМОП инвертора

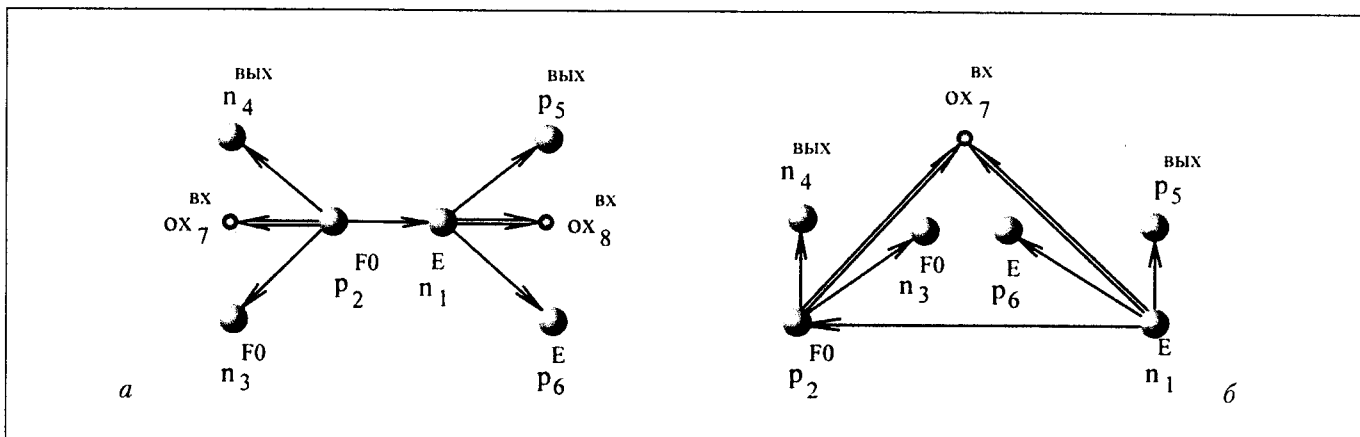


Рис. 2. Структурные формулы КМОП инвертора размерностью: а – $N=8$; б – $N=7$ в переходной схемотехнике

Если добавить изолирующую подложку (технология SOI – кремний на изоляторе), то среди огромного количества (4^9) структур КМОП инверторов ($N=9$) стоит особо выделить структуру не с горизонтальным, а с вертикальным строением МОП транзисторов, дающую максимальную информационную плотность. 3D структура вертикального КМОП инвертора с диэлектрической (окисной) изоляцией показана на рис. 3б. Для одновременного подключения областей n_1 и p_2 к шине «земля» (Gnd) введена проводящая область (нанопроводник) Au_8 , а для одновременного подключения областей p_5 и p_6 к шине «питания» (E) введена проводящая область (нанопроводник) Au_7 (рис. 3б). Возможен второй вариант. Упростить технологию можно, сделав эти проводники (Au_7 и Au_8) вертикальными, по бокам центрального изолирующего столба. Только тогда придется добавить изолирующие области для n_3 и p_4 . Изменится расположение контактных площадок Gnd и E, а также топология соединения out.

Система обозначений контактов следующая: входной контакт (вх – in), выходной контакт (вых – out), шина нулевого потенциала (F0 – Gnd (шина

«земля»)), Au – золотой нанопроводник для подачи потенциалов в полупроводниковые области.

Компьютерное моделирование для статических режимов

Работоспособность наноструктуры может быть подтверждена наличием «ступенчатой» передаточной характеристики, имеющей два устойчивых состояния при подключении подобной нагрузки.

При компьютерном моделировании физической структуры КМОП инвертора со структурной формулой рис. 3а, проводимом с ограничениями (минимальный топологический размер 20 нм, толщина подзатворного окисла – 4 нм), была получена передаточная характеристика, изображенная на рис. 4, из которой видно, что наноструктура выполняет инвертирующую функцию при определенной системе параметров.

Были проведены эксперименты по моделированию различных физических параметров наноструктуры для двух статических режимов, когда на выходе напряжение логической единицы и когда на выходе – напряжение логического нуля.

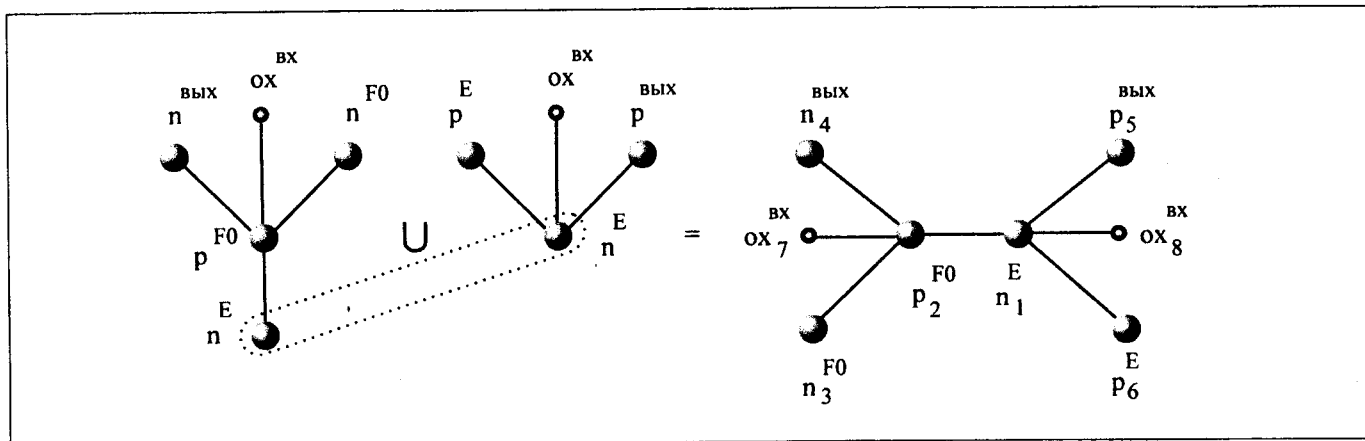


Рис. 1. Уравнение синтеза переходной модели КМОП инвертора

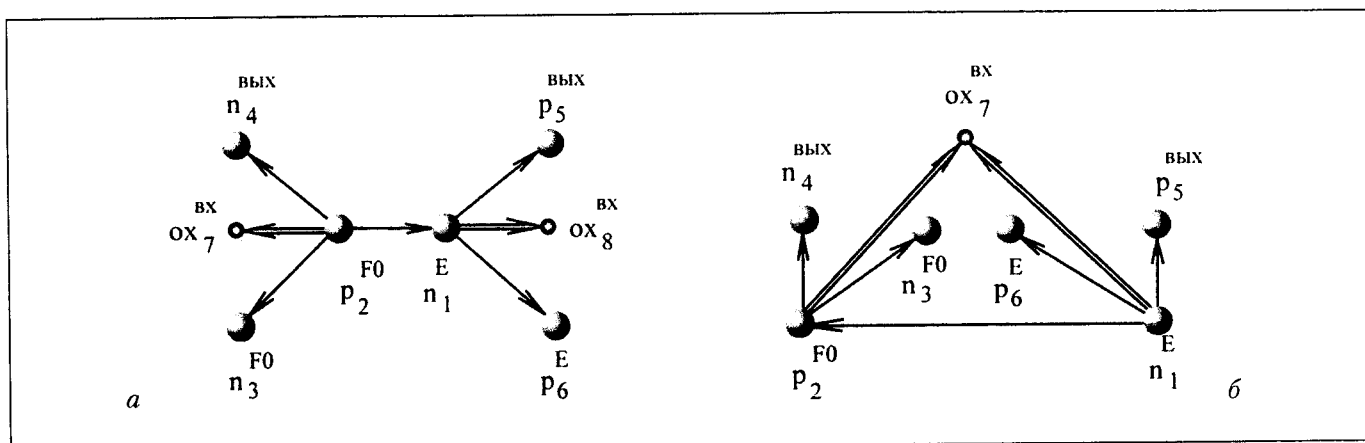


Рис. 2. Структурные формулы КМОП инвертора размерностью: а – N=8; б – N=7 в переходной схемотехнике

Если добавить изолирующую подложку (технология SOI – кремний на изоляторе), то среди огромного количества (4⁹) структур КМОП инверторов (N=9) стоит особо выделить структуру не с горизонтальным, а с вертикальным строением МОП транзисторов, дающую максимальную информационную плотность. 3D структура вертикального КМОП инвертора с диэлектрической (окисной) изоляцией показана на рис. 3б. Для одновременного подключения областей n₁ и p₂ к шине «земля» (Gnd) введена проводящая область (нанопроводник) Au₈, а для одновременного подключения областей n₅ и p₆ к шине «питания» (E) введена проводящая область (нанопроводник) Au₇ (рис. 3б). Возможен второй вариант. Упростить технологию можно, сделав эти проводники (Au₇ и Au₈) вертикальными, по бокам центрального изолирующего столба. Только тогда придется добавить изолирующие области для n₃ и p₄. Изменится расположение контактных площадок Gnd и E, а также топология соединения out.

Система обозначений контактов следующая: входной контакт (вх – in), выходной контакт (вых – out), шина нулевого потенциала (F0 – Gnd (шина

«земля»)), Au – золотой нанопроводник для подачи потенциалов в полупроводниковые области.

Компьютерное моделирование для статических режимов

Работоспособность наноструктуры может быть подтверждена наличием «ступенчатой» передаточной характеристики, имеющей два устойчивых состояния при подключении подобной нагрузки.

При компьютерном моделировании физической структуры КМОП инвертора со структурной формулой рис. 3а, проводимом с ограничениями (минимальный топологический размер 20 нм, толщина подзатворного окисла – 4 нм), была получена передаточная характеристика, изображенная на рис. 4, из которой видно, что наноструктура выполняет инвертирующую функцию при определенной системе параметров.

Были проведены эксперименты по моделированию различных физических параметров наноструктуры для двух статических режимов, когда на выходе напряжение логической единицы и когда на выходе – напряжение логического нуля.

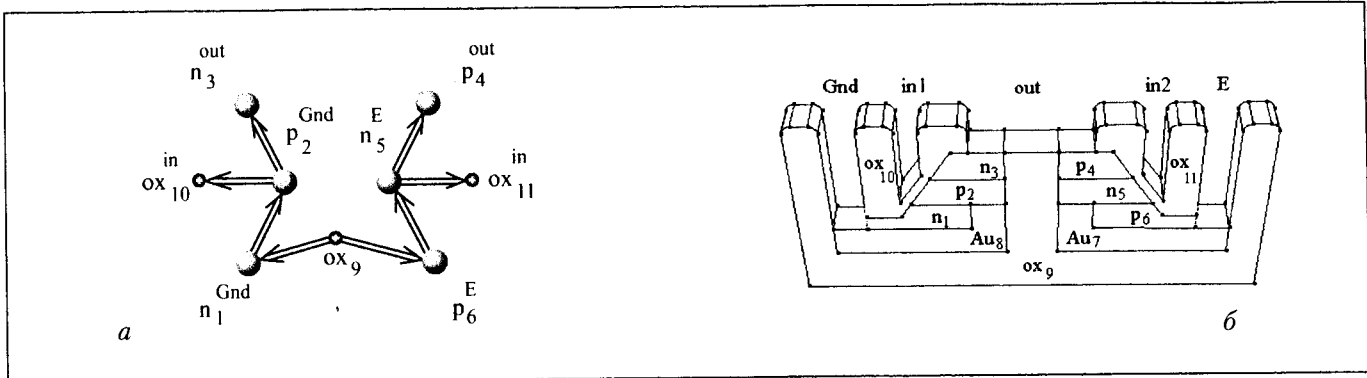


Рис. 3. Модель в переходной схемотехнике (а) и вертикальная 3D наноструктура КМОП инвертора (б)

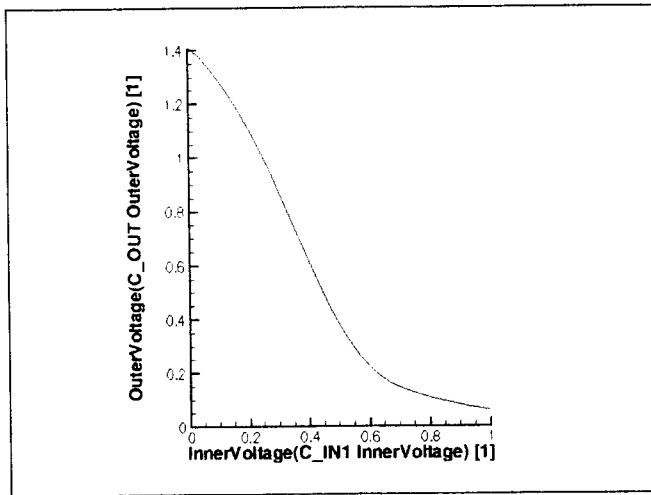


Рис. 4. Передаточная характеристика КМОП инвертора со структурной формулой рис. 3а

На рис. 5 представлены результаты компьютерного моделирования плотности дырок в 3D наноструктуре КМОП инвертора со структурной формулой рис. 3а для двух выходных режимов: логического нуля и логической единицы на выходе.

На рис. 6 отображены результаты компьютерного моделирования подвижности дырок в 3D наноструктуре КМОП инвертора со структурной формулой рис. 3а для двух выходных режимов: логического нуля и логической единицы на выходе.

На рис. 7. – результаты компьютерного моделирования пространственного заряда в 3D наноструктуре КМОП инвертора со структурной формулой рис. 3а для двух выходных режимов: логического нуля и логической единицы на выходе.

На рис. 8 – результаты компьютерного моделирования электростатического потенциала в 3D наноструктуре КМОП инвертора со структурной формулой рис. 3а для двух выходных режимов (напряжения логического нуля – u_0 и напряжения логической единицы u_1).

Компьютерное моделирование динамики

Для оценки быстродействия наноструктуры КМОП инвертора были промоделированы переходные процессы. На рис. 9 представлены графики входного (1) и выходного (2) напряжений вертикального КМОП инвертора со структурной формулой рис. 3а. Определим задержку наноструктуры по уровню «0,5».

В результате моделирования были получены следующие значения координат точек пересечения фронтов входного и выходного напряжений с серединой логического уровня выходного сигнала:

$$t_1 = 1,46903 \times 10^{-11} \text{ (сек)}$$

$$t_2 = 1,85512 \times 10^{-11} \text{ (сек)}$$

$$t_3 = 0,85472 \times 10^{-10} \text{ (сек)}$$

$$t_4 = 1,21935 \times 10^{-10} \text{ (сек)}$$

Задержки фронтов по уровню 0,5 составляют:

$$t^{10} = t_2 - t_1 = 0,38609 \times 10^{-11} = 3,8609 \times 10^{-12} \text{ (сек)}$$

$$t^{01} = t_4 - t_3 = 0,56463 \times 10^{-10} = 56,463 \times 10^{-12} \text{ (сек)}$$

Задержка наноструктуры определяется по формуле:

$$(t^{10} + t^{01})/2 = (3,8609 \times 10^{-12} + 56,463 \times 10^{-12})/2 = 60,3239 \times 10^{-12} \text{ (сек)},$$

и составляет около 60 пикосекунд.

Заключение

Разработана новая вертикальная наноструктура КМОП-инвертора, объединяющего достоинства КМОП-схемотехники (минимальная потребляемая мощность) и достоинства вертикальной интеграции вычислительных систем (максимальная информационная плотность).

Синтез и компьютерное моделирование проводились при проектной норме 20 нм, что опережает развитие современной нанoeлектроники и подтвердило работоспособность разработанной наноструктуры.

Вертикальная интеграция позволяет по-новому «строить» сверхбольшие интегральные схемы для суперкомпьютеров нового типа и уводит разработчиков от старых планарных технологий к 3D-технологиям, наиболее близким «живым системам», даю-

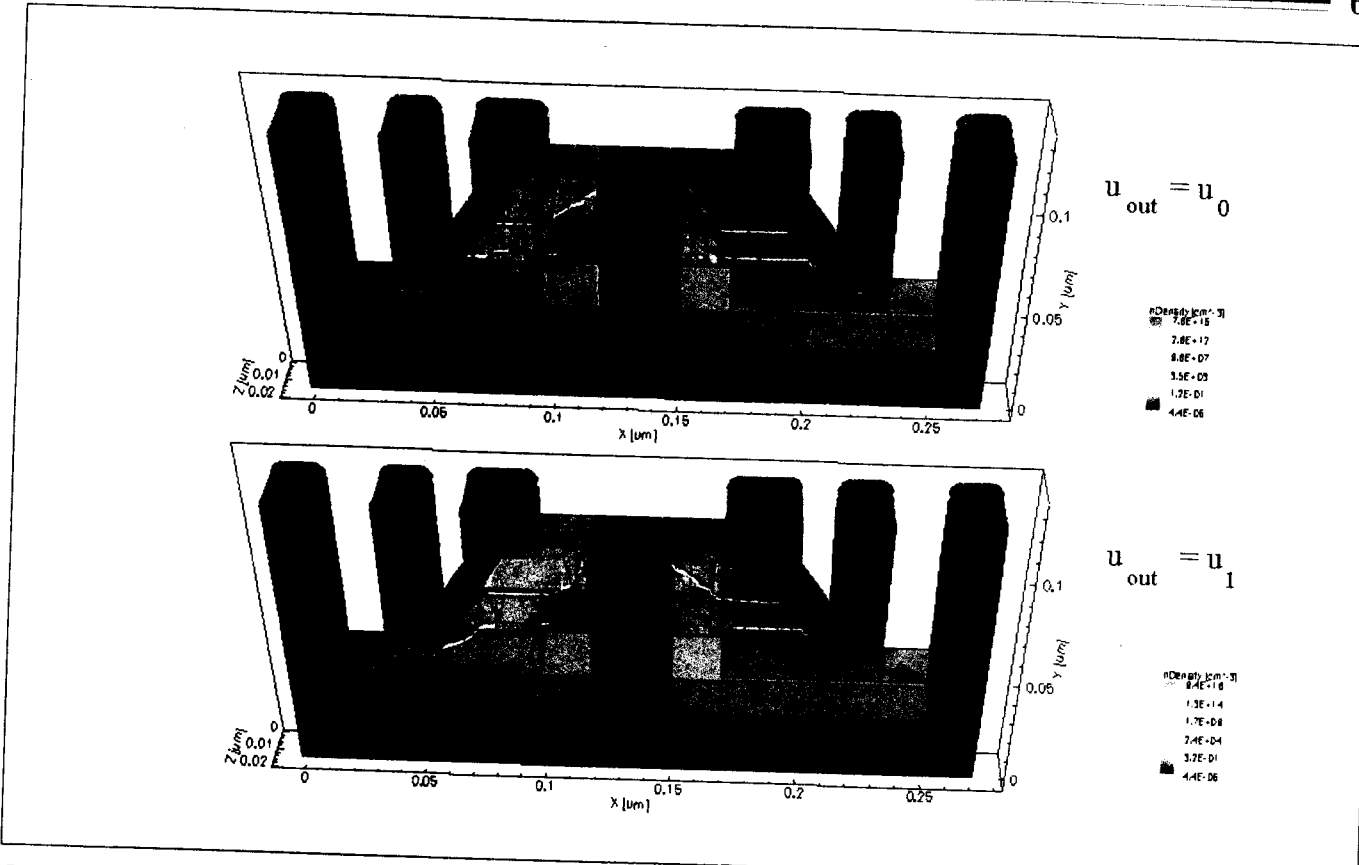


Рис. 5. Результаты компьютерного моделирования плотности дырок в 3D наноструктуре КМОП инвертора со структурной формулой рис. За для двух выходных режимов

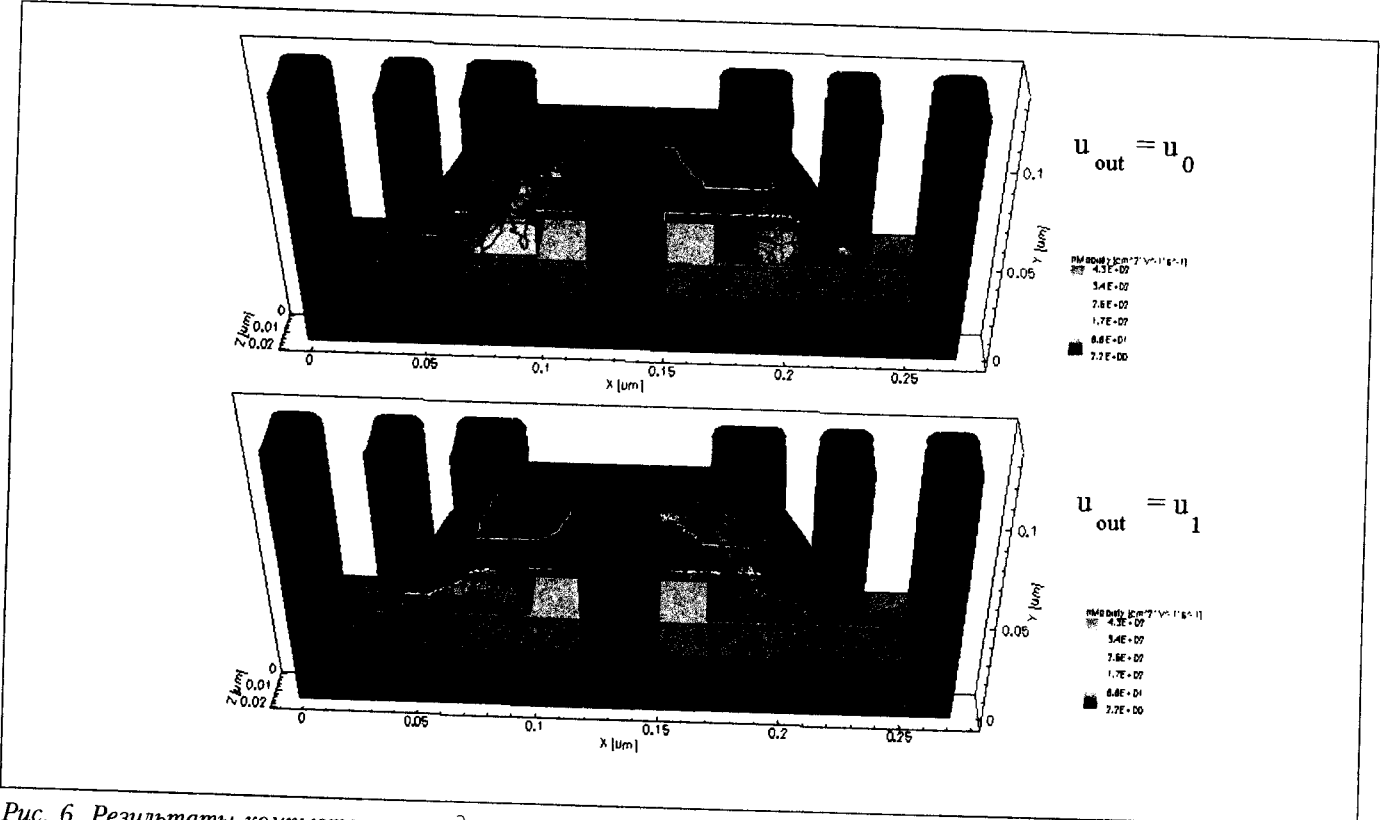


Рис. 6. Результаты компьютерного моделирования подвижности дырок в 3D наноструктуре КМОП инвертора со структурной формулой рис. За для двух режимов

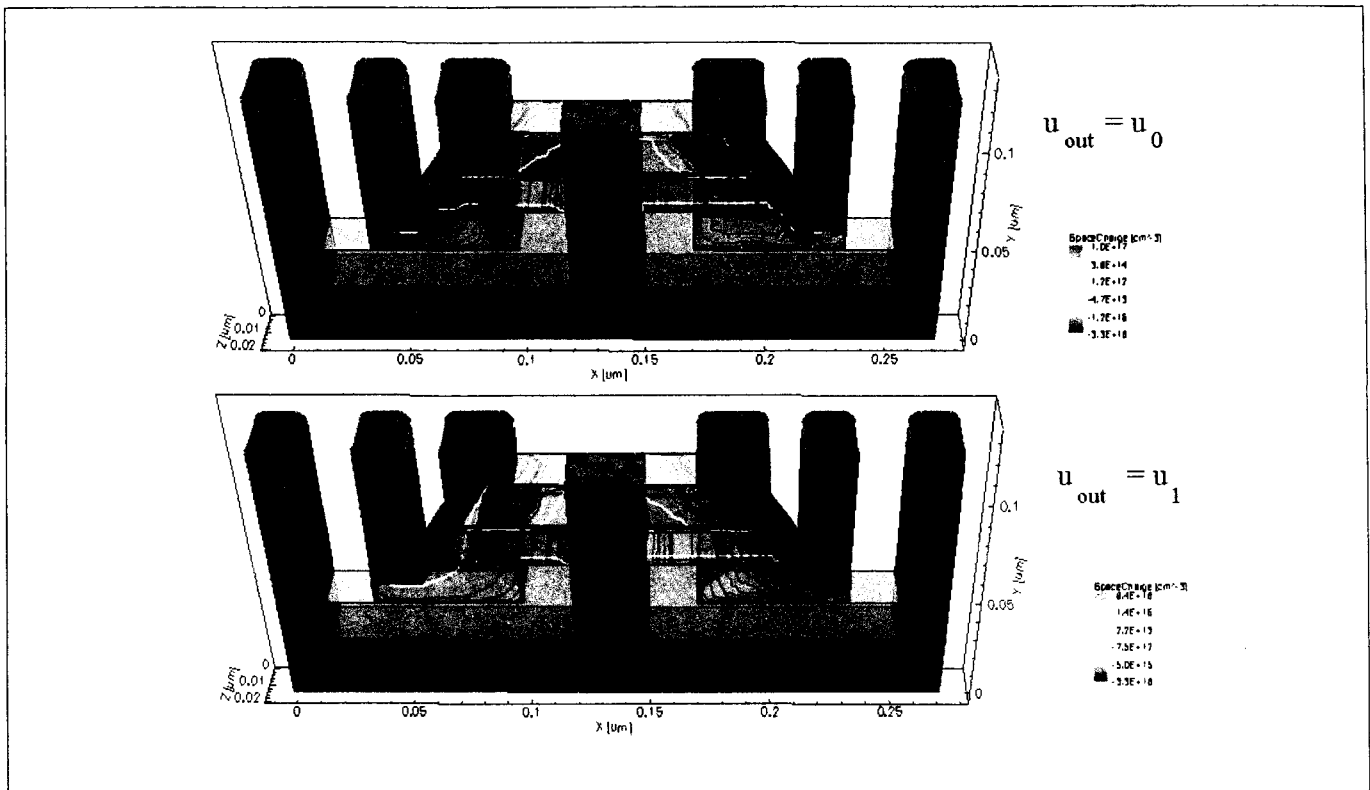


Рис. 7. Результаты компьютерного моделирования пространственного заряда в 3D наноструктуре КМОП инвертора со структурной формулой рис. За для двух выходных режимов

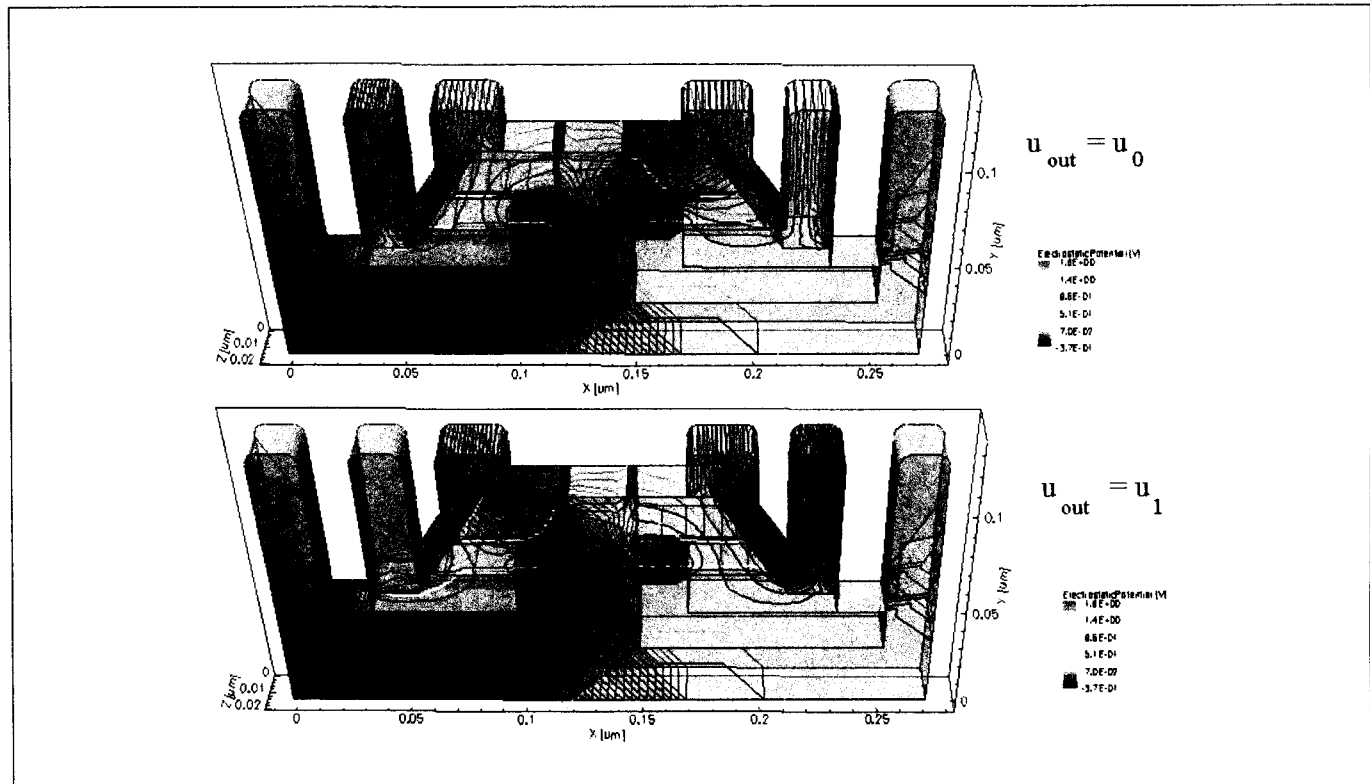


Рис. 8. Результаты компьютерного моделирования электростатического потенциала в 3D наноструктуре КМОП инвертора со структурной формулой рис. За для двух выходных режимов

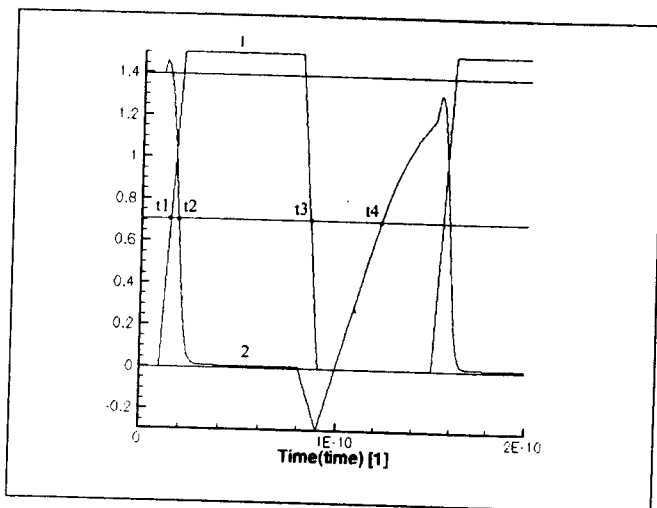


Рис. 9. Переходные характеристики вертикального КМОП инвертора со структурной формулой рис. 3,а

щим значительные преимущества по информационной плотности, что является важнейшим фактором для разработки суперкомпьютеров нового типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трубочкина Н.К. Схемотехника ЭВМ. – М.: МИ-ЭМ, 2008. 256 с.

2. Трубочкина Н.К. Качественный анализ, прогноз компьютерное моделирование МОП и КМОП носхемотехники для твердотельных классических суперкомпьютеров // Качество. Инновации. Образование. 2010. №8.

3. Trubochkina N.K. The junction circuitry theory of the elements of the inanimate and living synthesis systems and how it affects the development of nanotechnology. // 3-й Междунар. форум по нанотехнологиям (Rusnanotech 2010), Москва, 1-3 ноября 2010.

4. Трубочкина Н.К. Новая элементная база на основе слоистых структур // INTERMATIC-2010. Международная научно-техническая конференция «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения», 23-27 ноября 2010 г. Москва.

5. Трубочкина Н.К. Теория переходной схемотехники как инструмент разработки интеллектуальных наноструктур и наносистем // Школа-семинар по тематическому направлению развития НИС в нанoeлектронике, Москва, 13-15 декабря, 2010.

Трубочкина Надежда Константиновна
д-р техн. наук, профессор МГИЭМ

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ !

Напоминаем вам, что продолжается подписка на журнал **КАЧЕСТВО. ИННОВАЦИИ. ОБРАЗОВАНИЕ**

Подписку вы можете оформить:

- через отделения связи

каталог Агентства «Роспечать» – индекс 80620, 80621,
каталог «Пресса России» – индекс 14490,

- через редакцию

Дополнительную информацию можно получить по телефону: + 7 (495) 235-44-08

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ !

ОБРАТИТЕ ВНИМАНИЕ, ЧТО ЯВЛЯЯСЬ ПОДПИСЧИКОМ НАШЕГО ЖУРНАЛА, ВЫ УСКОРИТЕ ПУБЛИКАЦИЮ СВОЕГО МАТЕРИАЛА.