

Н.К. Трубочкина, В.В. Воробьев,
А.А. Соснин

КАЧЕСТВЕННО НОВАЯ ЧЕТЫРЕХ- СЛОЙНАЯ НАНОСТРУКТУРА И-НЕ ДЛЯ ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ СУПЕРКОМПЬЮТЕРОВ

Вниманию разработчиков элементной базы представлена качественно новая переходная 4-слойная полупроводниковая структура, реализующая логическую функцию И-НЕ. Структура обладает качественно лучшими параметрами в сравнении с транзисторным аналогом как в микро, так и нанодиапазоне.

N.K. Trubochkina, V.V. Vorob'ev,
A.A. Sosnin

QUALITATIVELY NEW 4-LAYERS NANOSTRUCTURE AND-NOT FOR THE LOGIC CIRCUITS OF SUPERCOMPUTERS

To attention of the element base developers is submitted qualitatively new junctional 4-layers semiconductor nanostructure. It realizes logic function AND - NOT and has qualitatively best parameters in comparison with transistor analogue, as in micro, and nano range.

Введение

Слоистые полупроводниковые структуры использовались в электронике давно [1-3], например, для реализации полупроводникового лазера (рис. 1).

Слоистая структура лазера представляет собой совокупность [1] перемежающихся полупроводниковых слоёв арсенида галлия- арсенида галлия алюминия *p*-типа, сформированных на подложке из арсенида галлия *n*-типа. «Рабочим телом» лазера является тонкая (0,5 мкм) плёнка («квантовая яма») арсенида галлия *p*-типа. При подаче напряжения на металлические электроды, между которыми заключена вся полупроводниковая структура, лазер возбуждается и генерирует излучение. Слоистые структуры этого типа можно назвать энергетическими.

Эксперименты [4-19, 22-30] показывают, что при усложнении взаимосвязей *p-n* переходов и возможности управлять потенциалами определенных слоев, слоистые структуры могут стать интеллектуальными, т.е. обладать логическими свойствами или памятью.

В данной статье рассматривается синтез и моделирование четырехслойной логической наноструктуры, реализующей функцию И-НЕ. Данная структура может быть использована при построении макросхем, например, процессоров будущих суперкомпьютеров.

Цели и задачи. В целях улучшения технических параметров транзисторного логического элемента И-НЕ для процессора суперкомпьютера была использована переходная схмотехника, позволяющая синтезировать математические модели логических

элементов и элементов памяти с предельно возможным количеством полупроводниковых областей и внутренних соединений [4-19].

Методология создания нового логического элемента И-НЕ включает в себя решение следующих задач:

1. синтез математической модели элемента;
2. генерация наноструктуры;
3. моделирование физических и электрических параметров наноструктуры;
4. тестирование наноструктуры.

С учетом последних технологических достижений были выбраны следующие топологические ограничения:

1. минимальный топологический размер (шаг маски) 10 нм;
2. минимальная толщина полупроводникового слоя 3 нм (используется для формирования транзисторного эффекта).

Синтез математической модели. Для синтеза переходного (состоящего из *p-n* переходов) элемента И-НЕ в качестве объединяемых частей были использованы [6]:

1. математическая модель переходного элемента, реализующего функцию И;
2. математическая модель переходного элемента, реализующего функцию НЕ.

Основное уравнение синтеза переходного элемента И-НЕ, позволяющее синтезировать модель без использования ЭВМ, имеет вид: см. рис. 2.

При объединении областей одного типа проводимости с одинаковым управлением разных моделей

(p^F_0, p^E) получается математическая модель элемента И-НЕ на два входа, состоящая из 8 полупроводниковых областей ($N=8$) (рис. 3а).

Для сравнения: синтез в транзисторной схемотехнике дает элемент, содержащий 11 полупроводниковых областей.

Генерация переходной наноструктуры И-НЕ.

При использовании алгоритмов, описанных в [5, 6], сначала получаем одну из множества структурных формул (рис. 3б), а потом и соответствующую ей интегральную четырехслойную структуру (рис. 3в), для которой на следующем этапе будут промоделированы её параметры и определена зона работоспособности.

Принципиальным отличием логических слоистых наноструктур от энергетических [1-3] является более сложная «архитектура» и необходимость подачи и управления (потенциала) в определенные (точечные) участки структуры.

Моделирование физических и электрических характеристик И-НЕ.

Для моделирования синтезированной наноструктуры использовался TCAD Synopsys, Sentaurus Device [20]. Была определена зона работоспособности 4-слойной наноструктуры, т.е. система параметров (концентрации, размеры и толщины областей, архитектура, управляющие воздействия), при которых она реализует свою функцию, т.е. функцию И-НЕ.

На рис. 4 представлены результаты моделирования физических и электрических характеристик 4-слойной наноструктуры И-НЕ.

Тестирование – определение работоспособности макросхеме.

При анализе передаточной характеристики на рис. 4г видно, что наноструктура И-НЕ работоспособна в заданном топологическом диапазоне (10нм/3нм). Наноструктура переключается и имеет два устойчивых состояния. Использование новой методологии и результаты моделирования подтверждают достижимость заявленного результата.

Научно-технический уровень данного решения.

Использование теории переходной схемотехники [19] в данном решении даёт количественный выигрыш:

уменьшено количество полупроводниковых областей с 11 (в транзисторном аналоге) до 8 (в переходном), выигрыш по областям составляет 37,5%; уменьшено количество внутренних соединений с трех (в транзисторном аналоге) до одного (в переходном), выигрыш по соединениям составляет 200%.

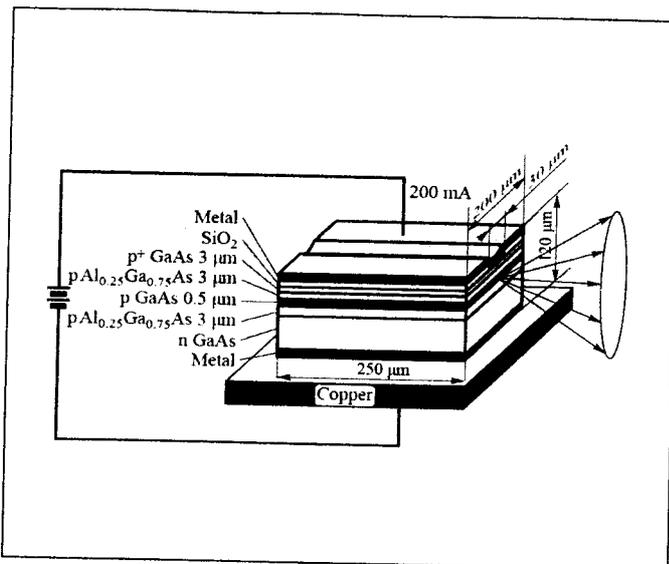


Рис. 1. Схематичное изображение структуры первого инжекционного торцевого ДГС лазера [1]

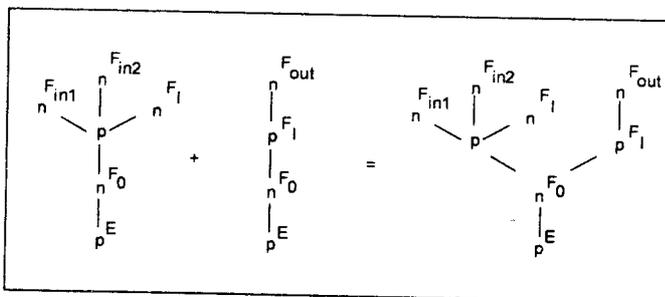


Рис. 2

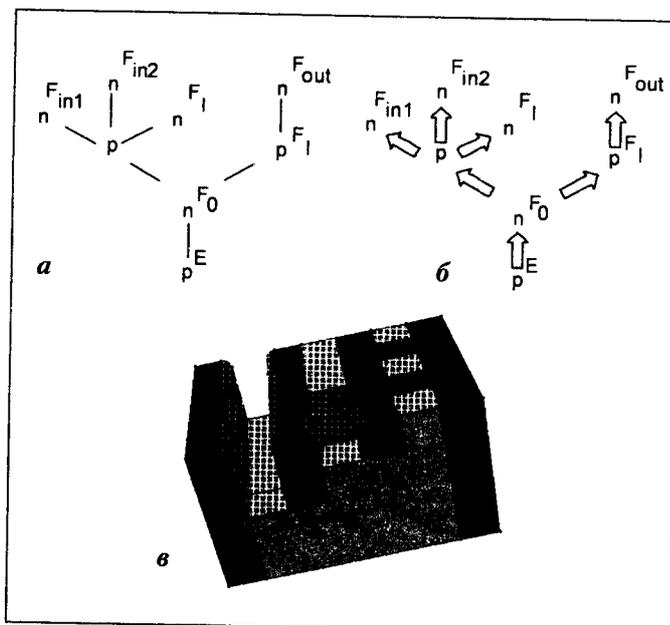


Рис. 3. Переход от математической модели переходного элемента И-НЕ к интегральной структуре: а – переходная математическая модель элемента И-НЕ на два входа, ($N=8$); б – структурная формула – результат применения процедуры генерации; в – 3d переходная структура И-НЕ – основа для моделирования

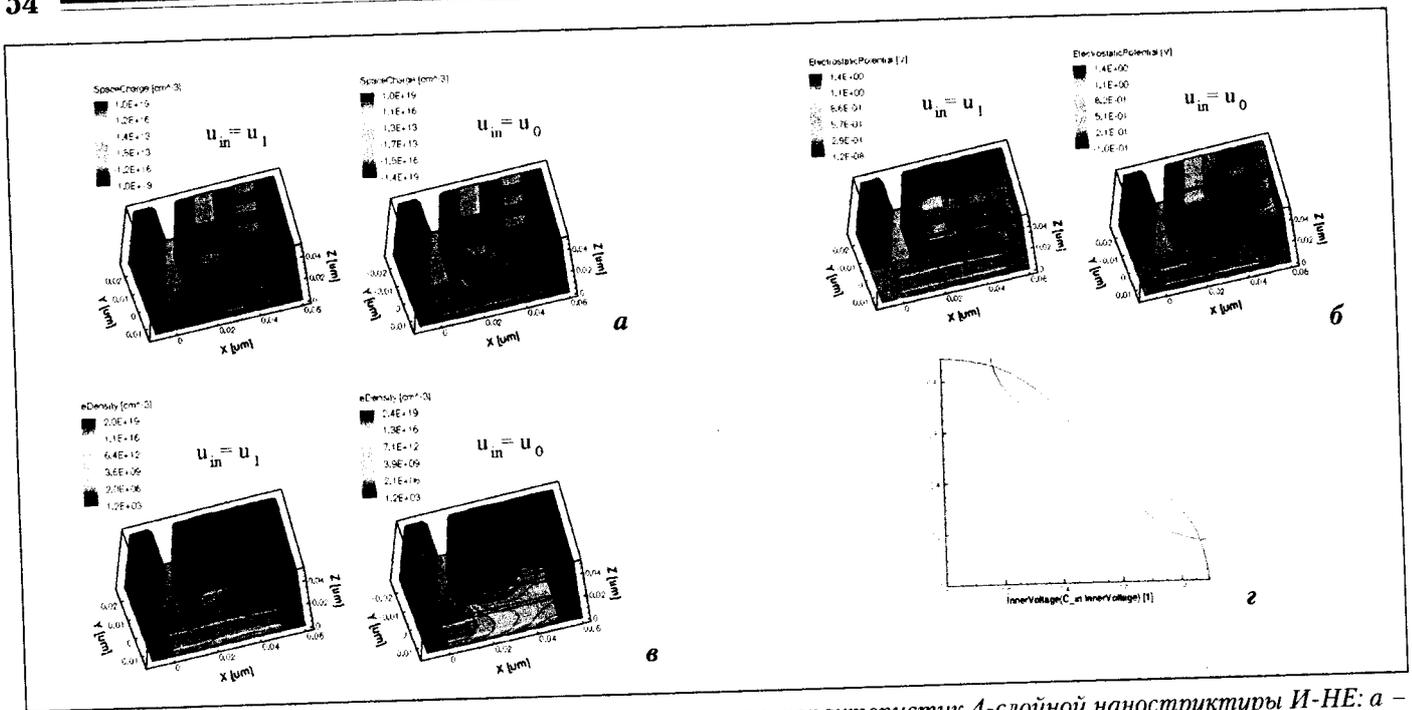


Рис. 4. Результаты моделирования физических и электрических характеристик 4-слойной наноструктуры И-НЕ: а – пространственный заряд в двух статических режимах; б – электростатический потенциал в двух статических режимах; в – плотность электронов в двух статических режимах; г – передаточная характеристика

Практическая ценность – технические параметры разработанной структуры

В результате эксперимента была синтезирована 4-слойная наноструктура И-НЕ со следующими техническими параметрами:

- площадь самой структуры (нм^2) – 50-50 (ТЗ 100-100);
- площадь структуры на базовом кристалле (нм^2) – 70-70 (ТЗ 120-120);
- информационная плотность (вентилей/ см^2) $2 \cdot 10^{10}$ (ТЗ $7 \cdot 10^9$);
- частота (Гц) $1 \cdot 10^{10}$ (ТЗ $0.5 \cdot 10^{10}$).

Заключение

Вниманию разработчиков элементной базы представлена качественно новая переходная 4-слойная полупроводниковая структура, реализующая логическую функцию И-НЕ [28]. Структура обладает качественно лучшими параметрами в сравнении с транзисторным аналогом как в микро, так и нанодиапазоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // ФТП. 1998. Т. 32(1). С.3.
2. Ханспенджер Р. Интегральная оптика. – М.: Мир, 1985. 379 с.
3. Ahland A., Schulz D., Voges E. Modeling and Design of Electroab sorption Modulators on GaInAsP // Int. J. Electron. Commun. (AEU) 1998. №5. С.322-328.
4. Трубочкина Н.К. Синтез на ЭВМ функционально-интегрированных элементов // Вопросы радиоэлектроники, сер. Технология производства и оборудование, вып.1. 1985, с.20.
5. Трубочкина Н.К. Логические элементы статических БИС. – М.: МИЭМ, 1987.
6. Трубочкина Н.К. Машинное моделирование функционально-интегрированных элементов: Учебное пособие. – М.: МИЭМ, 1989.
7. Патент на изобретение. Трубочкина Н.К., Петросянц К.О. Комплементарный элемент ИЛИ – НЕ и его электрическая схема. Заявка: 94023881/25, 24.06.1994 Опубликовано: 27.10.1997.
8. Патент на изобретение. Трубочкина Н.К., Петросянц К.О. Комплементарная биполярная схема И – НЕ (варианты) / 05.08.1993. Опубликовано: 27.10.1997.
9. Патент на изобретение. Трубочкина Н.К., Петросянц К.О. Комплементарная биполярная схема И-НЕ Заявка: 94030054/25, 04.08.1994 Опубликовано: 20.02.1997.
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. Трубочкина Н.К. Обзор и анализ состояния элементной базы для микроиндустрии. Перспективы развития. Сб. трудов XVII Международной студенческой конференции-школы-семинара. – Судак, 2009.
14. Трубочкина Н.К. Переходная 3D наносхемотехника – новая концепция и новое качество в создании трехмерных интегральных схем // Качество. Инновации. Образование. 2009. №5.
15. Trubochkina N.K. Interactive 3D in Science and Art: From Visual Analysis of 3-D Intelligent nano-Circuitry to 3-D Art Galleries on the Web. / International Scientific Seminar "Visual Computing in Fundamental Science and Academic Research". PP. 19-25.
16. Трубочкина Н.К. Смешанное моделирование ступенчатого биполярного транзистора с минимальным топологическим размером 20 нм и толщиной базы 3 нм. // Качество. Инновации. Образование. 2009. №11.
17. Инновационный подход к разработке элементной базы суперкомпьютеров на базе нанотехнологий и переходной схемотехники (русс, англ, нем). DVD – сборник научных работ Федерального Агентства по образованию РФ, Трубочкина Н.К. (рус.), СеВIT-2010. Информационные технологии в образовании. Ганновер 2-6 марта 2010.
18. Трубочкина Н.К. Моделирование внутреннего и поверхностного р-п переходов с минимальным топологическим размером 20 нм и электрическим воздействием на электроды // Качество. Инновации. Образование. 2010. №5.
19. Видеоролик «Виртуальная нанофабрика для создания элементной базы суперкомпьютеров». Трубочкина Н.К. (англ.) СеВIT-2010. Информационные технологии в образовании. Ганновер, 2-6 марта 2010.
20. Sentaurus Device. Synopsys. Version 2008. Tutorial. PP. 163-757. Registered Trademarks (©)Synopsys www.synopsys.com/Tools/TCAD/Pages/default.aspx
21. Semiconductor Device Simulation. R.E. Bank, D.J. Rose and W. Fichtner, "Numerical Methods for Semiconductor Device Simulation // IEEE Transactions on Electron Devices, 1983. V. ED-30, №. 9, PP. 1031–1041,
22. Воробьев В.В., Соснин А.А. Моделирование логических наноэлементов с улучшенными параметрами для суперкомпьютеров // XVIII Международная студенческая конференция-школа-семинар «Новые информационные Технологии», 2010, Судак. Сб. трудов. С. 193-194.
23. Попович И.П. Переходная схемотехника в биологии: бистабильные ячейки памяти / там же. С. 200-201.
24. Лукьянчиков И.И., Белый А.В. Интеллектуальная наноструктура И-НЕ для быстродействующего суперкомпьютера с повышенной информационной плотностью / там же. С. 201-202.
25. Н.К. Трубочкина. Сравнение моделей наноструктур четырех типов переходной схемотехники. / там же. С. 40-50.
26. Ponomarev D., Panfilov P., Saksonov E., Trubochkina N. Using visualization for computer architecture research and education. / Научная конференция «Новые информационные технологии и менеджмент качества». Турция 26-28 мая, Материалы конференции, С. 94-96.
27. Патент РФ на полезную модель № 2009144397 от 02.12.2009. «Биполярный транзистор». Трубочкина Н.К.
28. Заявка № 2010119061 от 14.05.2010 на полезную модель «Интегральный логический элемент И-НЕ на основе слоистой трёхмерной наноструктуры». Воробьев В.В, Соснин А.А., Трубочкина Н.К.
29. Заявка № 2010119553 от 17.05.2010 на полезную модель «Полупроводниковая структура логического элемента И-НЕ». Белый А.В., Лукьянчиков И.И., Трубочкина Н.К.
30. Заявка № 2010119999 от 19.05.2010 на полезную модель «Ячейка памяти на базе тонкослойной наноструктуры». Орлов П.В., Попович И.П., Трубочкина Н.К.

Трубочкина Надежда Константиновна
д-р техн. наук, профессор
Московский институт электроники и
математики (МИЭМ)
e-mail: nadin@miem.edu.ru