

---

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ УКРАИНЫ  
"КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ"

---

# Електроніка і зв'язь

Електроніка та зв'язок  
Electronics and Communications

Научно-технический журнал  
Основан в 1995 году

Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии»

4(63) • 2011

---



---

# Электроника и связь

Научно-технический журнал  
Свидетельство о регистрации КВ № 9314 от 03.11.2004 г.

---

## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

**Ю. И. Якименко**, д-р техн. наук, проф., акад. НАН Украины

## ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

**А. В. Кириленко**, д-р техн. наук, проф., акад. НАН Украины

**В. Я. Жуйков**, д-р техн. наук, проф.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**В. Г. Абакумов**, д-р техн. наук, проф.

**В. М. Безрук**, д-р техн. наук, проф.

**А. В. Борисов**, канд. техн. наук, проф.

**А. Ф. Буткевич**, д-р техн. наук, проф.

**В. Г. Вербицкий**, д-р техн. наук, с. н. с.

**А. Г. Власюк**, д-р техн. наук, проф.

**Г. С. Воробьев**, д-р физ.-мат. наук, проф.

**С. В. Денбновецкий**, д-р техн. наук, проф.

**В. С. Дидковский**, д-р техн. наук, проф.

**Ю. М. Калниболотский**, д-р техн. наук, проф.

**К. В. Ковальчук**, канд. физ.-мат. наук

**П. П. Лошицкий**, д-р техн. наук, проф.

**А. Н. Лысенко**, д-р техн. наук, доц.

**В. Ф. Мачулин**, д-р физ.-мат. наук, проф., акад. НАН Украины

**О. Н. Петрищев**, д-р техн. наук, проф.

**В. В. Пилинский**, канд. техн. наук, проф.

**Л. Д. Писаренко**, д-р техн. наук, проф.

**Ю. М. Поплавко**, д-р физ.-мат. наук, проф.

**И. Н. Пустинский**, д-р техн. наук, проф.

**П. Г. Стахив**, д-р техн. наук, проф.

**Р. Стржелецкий**, проф.

**В. И. Тимофеев**, д-р техн. наук, проф.

**Г. И. Чурюмов**, д-р техн. наук, проф.

**С. А. Харитонов**, д-р техн. наук, проф.

**Ю. С. Ямненко**, д-р техн. наук, проф.

**В. П. Яценко**, д-р мед. наук, проф.

## ОТВЕТСТВЕННЫЙ ЗА ВЫПУСК

**В. И. Тимофеев**, д-р техн. наук, проф.

## ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР

**А. В. Коржик**, канд. техн. наук, доц.

*Рекомендовано к печати Ученым советом ФЭЛ НТУУ «КПИ»  
(Протокол № 03/11 от 28.03.11)*

## Адрес редакции:

03056, г. Киев-56, ул. Политехническая, 16, корпус 12, к. 116

Тел. +38(044)454-94-39, e-mail: journal\_el\_com@fel.ntu-kpi.kiev.ua

ISSN 1811-4512

© Национальный технический университет  
Украины «КПИ», 2011

---



## Содержание

### Наноструктуры и нанотехнологии в электронике

<i>О.В. Мачулянський, М.В. Родіонова, В.В. Пілінський, В.Б. Швайченко</i>	Застосування наноподібних структур для розв'язку задач забезпечення електромагнітної сумісності .....	6
<i>В.А. Бахов, А.С. Мазинев, Е.А. Наздеркин, Л.Д. Писаренко</i>	Влияние структурной неоднородности на проводимость полупроводниковых материалов .....	11
<i>С.В. Бондарец, С.Ю. Быковский, И.Е. Марончук, И.И. Марончук, А.Н. Петраш, С.Б. Смирнов, Д.Д. Санникович</i>	Наногетерозпитаксиальные структуры с квантовыми точками, полученные методом жидкофазной эпитаксии на основе GaP .....	15
<i>Т.П. Дьячкова, А.В. Мележик, А.Г. Ткачев, Е.Ю. Филатова</i>	Углеродные нанотрубки и их композиты с полианилином: перспективы применения .....	21
<i>О.Д. Вольпян, А.И. Кузьмичёв</i>	Наноразмерные электронно-фотонные устройства на основе локализованных плазмонов .....	26
<i>К.В. Кутний</i>	Наноструктурные материалы на основе чистого титана и биорастворимого магниевое сплава для создания хирургических имплантатов .....	31
<i>В.И. Слюсар, Д.В. Слюсар</i>	Концепция конструктивного исполнения наноантенных решеток в составе наносхем беспроводных сетей <i>ti</i> mo на кристалле .....	37
<i>В.И. Глотов, П.В. Деминский, Н.О. Ляхова, И.В. Масол, В.И. Осинский</i>	Кластерная модель образования нитрида алюминия в нанореакторах оксида алюминия .....	40

### Твердотельная электроника

<i>Т.Ю. Білик</i>	Фотолюмінісценція шарів пористого кремнію отриманих хімічним способом .....	45
<i>А.Ю. Романов, Д.А. Феськов</i>	Разработка программного симулятора сетей на кристалле .....	48
<i>Б.Б. Працюк, Ю.В. Прокопенко, К.Г. Савин, П.Ю. Сергиенко</i>	Перестраиваемые фильтры СВЧ на основе микрополосковой линии .....	53
<i>М.Г. Душейко, Н.В. Максимчук, В.О. Ульянова</i>	Мікроелектронні амперометричні сенсори для біохімічних досліджень .....	57
<i>Л.Н. Королевич, А.В. Борисов, М.К. Родионов</i>	Феноменология физико-геометрического описания понятия кристаллической решетки .....	62

### Теория сигналов и систем

<i>V.Sh. Melikyan, A.A. Durgaryan, H.P. Petrosyan, A.G. Stepanyan</i>	Power Efficient, Low Noise 2-5 GHz Phase Locked Loop .....	66
<i>Т.В. Бодня, В.П. Зубарь, А.С. Чайковский</i>	Инверторы импеданса в LC-генераторах гармонических колебаний .....	72

### Методы и средства обработки сигналов и изображений

<i>Т.А. Терещенко, Д.В. Лазарев</i>	Применение обобщенного спектрального преобразования в ориентированном базисе в системах CDMA .....	79
<i>В.Г. Абакумов, О.Ю. Ломакина, О.Б. Яровенко</i>	Застосування жестів рук при людино-машинному інтерфейсі ....	83

УДК 621.396.679.4

В.И. Слюсар<sup>1</sup>, д-р техн. наук, Д.В. Слюсар<sup>2</sup>

## Концепция конструктивного исполнения наноантенных решеток в составе наносхем беспроводных сетей mimo на кристалле

Предложены концептуальные основы конструктивного выполнения наноантенных решеток в составе многослойных наносхем для реализации беспроводных сетей на кристалле (WiNoC) на основе технологий MIMO и MultiUser MIMO.

In this paper the conceptual basics of construction design of nanoantennas array as a part of multilayered nanonodes for realisation of wireless networks on the chip (WiNoC) on the basis of technologies MIMO and MultiUser MIMO are presented.

**Ключевые слова:** наносхемы, наноантенные решетки, беспроводные сети на кристалле (WiNoC), технологии та MultiUser MIMO.

### Введение

Важным направлением развития SoC стало появление сетей на кристалле (Network on Chip, NoC). Согласно [1], парадигма сети-на-чипе (NoC) возникла как методология проектирования мультиядерных чипов. Однако использование традиционной двумерной топологии микросхем вскоре обозначило граничные возможности NoC, обусловленные высоким временем ожидания передачи пакетов и потерями в энергетике сигналов, вызванными не только омическим сопротивлением, но и делением мощности при разветвлении сигналов.

В этой связи в последнее время усилия многих специалистов сосредоточились на теоретической проработке вопросов создания беспроводных сетей на чипе (Wireless Network on Chip, WiNoC) в диапазонах от десятков ГГц до сотен ТГц [1]. Среди технологий, обеспечивающих высокую скорость передачи данных внутри WiNoC, заслуживают внимания методы MIMO и MultiUser MIMO (мульти-MIMO), вариант использования которых в нано-WiNoC предложен, например, в [2].

На фоне совершенствования технологий многослойной эпитаксии для изготовления наносхем при создании беспроводных сетей на кристалле следует максимально использовать возможности трехмерных топологий при конструировании приема-передающих наноантенных решеток. Поэтому целью статьи является разработка концептуальных основ конструктив-

ного исполнения вертикально расположенных решеток нанотенн в составе наносхем, реализующих беспроводную передачу данных в сети на кристалле.

### Концепция пирамидального построения наносхем

При многослойной топологии наносхем для повышения эффективности рассеяния радиоволн в интересах применения технологии MIMO заслуживает внимания использование пирамидальных конструкций наностанций. При этом могут быть задействованы кольцевые, прямоугольные либо многогранные пирамидальные формы, в которых нановибраторы располагаются на вертикальных стенках пирамидального слоя.

Такое размещение элементов антенн на наносхеме позволяет убрать затенение наностанциями друг друга и улучшает условия рефракции радиоволн внутри корпуса SoC. Кроме того, создаются условия для дополнительного увеличения количества антенных элементов в составе нанорешеток излучателей, что в рамках технологии MIMO позволяет пропорционально повысить скорость передачи данных. На вершине пирамиды для связи с макроуровнем могут размещаться диэлектрические резонаторные антенны (ДРА) (рис. 1) либо другие разновидности объемных электрически малых излучателей, а также печатные микрополосковые антенны.

Следует отметить, что для реализации высокоскоростной передачи системы MIMO достаточно сформировать антенные решетки в 4 - 8 слоях нанопирамиды, хотя, если скорость передачи не является критичной, можно ограничиться и парой слоев.

Прототипом рассмотренных конформных конструкций антенных систем в виде усеченной пирамиды может служить четырехсекционная антенная решетка РЛС АРАР X-диапазона, созданная в рамках международного консорциума с участием компаний Thales, Raytheon Naval и Maritime Systems для ПВО кораблей класса фрегат [3]. Антенная система этой РЛС представляет собой совокупность четырех решеток, расположенных по граням усеченной пирамиды (рис. 2).

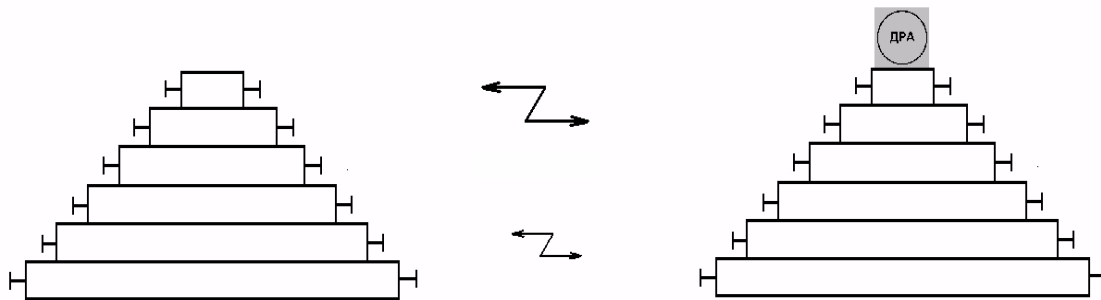


Рис. 1. Наносистема MIMO с диэлектрической резонаторной антенной в верхнем слое одной из нанопирамид для реализации радиошлюза с макроуровнем

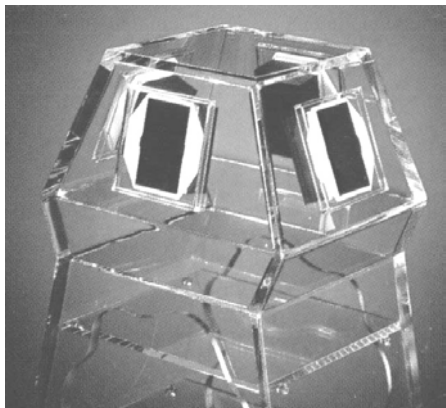


Рис. 2. Антенная решетка РЛС APAR

Каждая из 4-х граней содержит более 3000 приемо-передающих модулей и обеспечивает обзор сектора пространства  $120^\circ$  по азимуту и  $70^\circ$  по углу места. Такой подход позволяет максимально реализовать возможности конформных антенных решеток по эффективному обзору пространства.

Частотное или временное мультиплексирование сигналов в MIMO-наносхемах при необходимости повышения скорости передачи может быть дополнено поляризационным разделением каналов, для чего следует применять наноантенны двойной поляризации, например, турникетные нановибраторы. На рис. 3 приведен вариант размещения турникетной нанорешетки формата  $2 \times 4$  на вертикальной грани пирамидального уровня.

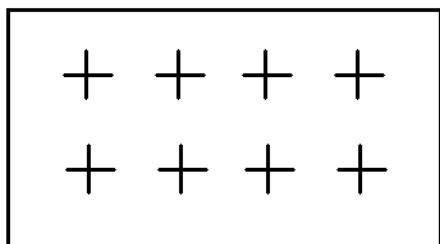


Рис. 3. Поляризационное разделение каналов с помощью турникетных нановибраторов

Реализация рассмотренного варианта вертикального размещения нановибраторов со-

пряжена с определенными технологическими трудностями, поэтому предпочтительнее использовать вертикально-горизонтальное размещение элементов нанорешеток, применив, например, на пьедесталах пирамиды горизонтально расположенные единичные вибраторы, печатные излучатели либо малоэлементные наноантенны Уда-Яги (рис. 4).

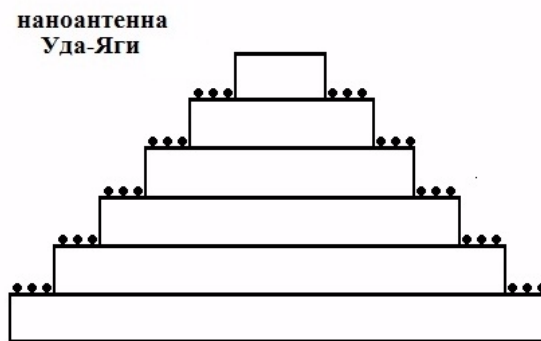


Рис. 4. Горизонтально-расположенные наноантенны Уда-Яги в составе вертикальных решеток наноизлучателей

Протяженность уступа пирамиды для размещения наноантенны Уда-Яги зависит от длины волны излучения, межэлементного расстояния вибраторов в антенне и их количества. Так, при частоте несущей сигналов 100 ТГц и полуволновом расположении антенных элементов в решетке Уда-Яги межэлементное расстояние между излучателями будет равно 1,5 мкм. При четырех элементах в составе наноантенны в этом случае необходимо обеспечить длину пьедестала в горизонтальной плоскости не менее 8 мкм. В случае ограничений на величину этого параметра порядка 10 - 15 мкм при снижении частоты излучения количество вибраторов антенны Уда-Яги может быть уменьшено до 2 - 3.

Следует отметить, что для реализации высокоскоростной передачи системы MIMO достаточно сформировать 4 - 8 слоев нанопирамиды, хотя, если скорость передачи не является кри-

точной, можно ограничиться и парой слоев (по одному излучателю в каждом слое).

На несколько слоев может устанавливаться одна общая наноантенна. Например, при 6-слойной топологии можно использовать двухуровневую пирамиду, в которой каждый из уровней образован тремя слоями, а наноантенна располагается в центральном из них (рис. 5). В результате получим два излучателя в вертикальной плоскости. В зависимости от толщины слоя на один уровень при современных технологиях может приходиться от двух до 4 слоев. К примеру, в 4-слойном варианте реализации пирамидальных уровней 8-слойная эпитаксия позволяет сформировать двухэлементную решетку по вертикали. В случае полуволнового шага элементов решетки в вертикальной плоскости при частоте излучения 100 ТГц толщина уровня пирамиды должна быть 1,5 мкм, что при 3-слойной его эпитаксии приводит к допустимой толщине одного слоя топологии наносхемы 500 нм. Выполнение данного требования при нынешнем уровне развития технологий не является сложным.

В заключение следует указать на возможность применения разнотипных уровней нанопирамид, отличающихся по количеству слоев. При этом в обработке сигналов следует учитывать неэквидистантный характер антенных решеток либо пытаться выдержать одинаковое расстояние между их элементами за счет размещения наноантенн в различных слоях смежных пирамидальных уровней.

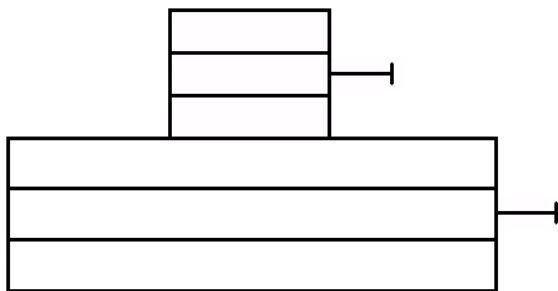


Рис. 5. Двухуровневая пирамидальная топология

## Выводы

Предложенная концепция пирамидальной топологии наносхем позволяет органично сочетать многоуровневую эпитаксию наноструктур с формированием разнесенных в вертикальной плоскости решеток наноантенных элементов. На основе рассмотренных пирамидальных конструкций наносхем возможно создавать двумерные и трехмерные антенные решетки излучателей с большим количеством элементов. В рамках технологии MIMO это позволяет пропорционально повысить скорость передачи данных за счет пространственного и поляризационного мультиплексирования информационных потоков. В результате беспроводная сеть на кристалле получает дополнительные степени свободы для маршрутизации и наращивания канальной емкости.

Совершенствование многоэлементных антенных конструкций пирамидальных наносхем, а также их электродинамическое моделирование являются предметом дальнейших исследований.

## Литература

1. *Partha Pratim Pande, Amlan Ganguly, Kevin Chang, Christof Teuscher. Hybrid Wireless Network on Chip: A New Paradigm in Multi-Core Design. // NoCArc 2009. - December 12, 2009, New York, USA. - <http://www.diiit.unict.it/users/mpalesi/nocarc09/slides/pande.pdf>.*
2. *Слюсар В.И., Слюсар Д.В. Метод мульти-MIMO для беспроводной сети на чипе. // VII міжнародна науково-технічна конференція студентства і молоді „Світ інформації та телекомунікацій – 2010” (15- 16 квітня 2010 р.). – Київ: ДУІКТ. - С. 53–54. - <http://www.slyusar.kiev.ua/DUIKT kniga buklet4.pdf>.*
3. *Слюсар В.И. Цифровые антенные решетки: будущее радиолокации. // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2001. – № 3. – С. 42-46. – [http://www.electronics.ru/pdf/3\\_2001/08.pdf](http://www.electronics.ru/pdf/3_2001/08.pdf).*

<sup>1</sup>Центральный научно-исследовательский институт вооружения и военной техники Вооруженных Сил Украины

<sup>2</sup>Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»