

УДК 004.31, 538.945

И.Д. Войтович, академик НАН Украины, А.И. Золот, канд. техн. наук, Н.И. Ходаковский, канд. техн. наук, А.А. Мерзвинский, канд. техн. наук, П.А. Мерзвинский

Управление свойствами наноструктур при создании технологических процессов построения наноприборов

Рассмотрены возможности комбинированных комплексов, которые состоят из установок электронной и сканирующей туннельной литографии и позволяют получать экспериментальные образцы наноприборов из структур размером в несколько десятков атомных слоев. Показано, что создание электронного прибора нанометровых размеров может быть осуществлено путем сочетания технологии формирования наноструктур в системе «острие-подложка» и наличия узла управления для высокоскоростного построения задаваемых программно наноэлементов.

The possibilities of combined systems, which consist of units of the electron and scanning tunneling lithography and lead to the experimental samples of nanodevices of the structures up to several tens of atomic layers. It is shown that the creation of an electronic device nanoscale can be achieved by combining the technology of formation of nanostructures in the «tip-substrate» and the presence of the control unit for high-speed building set programmatically nanelements.

Ключевые слова: электронная и сканирующая туннельная литография, управление процессом создания наноструктур, наноприборы, зондовые методы литографии.

Введение

Возможности комбинированных комплексов, которые состоят из установок электронной литографии и литографии с использованием сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) позволяют получать экспериментальные образцы наноприборов, которые состоят из наноструктур размером менее 10 нм, соответствующих нескольким десяткам атомных слоев.

Указанный подход может быть также эффективно использован при создании электронных наноприборов, который, в свою очередь, наталкивается на необходимость решения ряда задач: создание возможности управления свойствами наноструктур путем вариации геометрии и структурного состава нанометрового электронного прибора; решение проблем микромеханики в нанометровой области; разработка технологических методов производства нанометровых компонентов электронных приборов.

Решение указанных задач позволяет определить возможности управления свойствами наноструктур для создания технологических процессов построения наноприборов [1-3]. Значительные возможности технологических решений при изготовлении структур кремний-на изоляторе (КНИ) позволили получить новые конструктивно-технологические варианты построения наноразмерных полевых транзисторов. Указанные варианты уже в субмикронной области за счет полной диэлектрической изоляции КНИ – транзисторов существенно отличаются от подобных приборов на объемном кремнии за счет снижения энергопотребления, большого пробивного напряжения и высокого быстродействия. В нанометровом диапазоне в транзисторах на структурах КНИ при этом проявляются квантово-размерные эффекты.

Подходы к управлению свойствами наноструктур в процессе изготовления наноприборов

При изготовлении транзисторов с размерами меньше 100 нм с помощью классической МОП– технологии возникает ряд проблем. В частности, смыкание областей обедненности истока и стока за счет обратно смещенного перехода сток-база, поскольку при определенных условиях длина канала транзистора становится сравнимой с областью пространственного заряда стокового перехода.

При длине канала транзистора в десятки нанометров способом, который позволяет подавить эффект смыкания, является перераспределение потенциала в базе транзистора за счет напряжения на дополнительном затворе. Также для решения указанной проблемы используется увеличение степени легирования базы. Для этого можно предложить конструкции нанотранзисторов с разными затворами: с дополнительным затвором, который находится в плоскости канала; трехмерным затвором, который опоясывает один канал с трех сторон; трехмерным затвором, который опоясывает каждый из каналов многоканальной конструкции.

Использование литографических процессов при определении размеров островков кремния рядом с электростатическим управлением величиной потенциальных барьеров позволяет получать транзисторные наноструктуры с воспроизво-

димыми характеристиками. Для получения приборов, которые работают при комнатной температуре с воспроизводимыми параметрами, необходимо их размеры уменьшать к величинам, меньшим размеров самоформирующих квантовых точек, или обеспечить высокую степень гладкости обрабатываемой поверхности и исключить варьирование ширины квантовых КНИ – линий. Соблюдение приведенных требований возможно при достижении уровня литографического процесса с разрешимостью в единицы нанометров.

Поскольку необходимо получать не только отдельные транзисторы, но и формировать из них блоки памяти в сверхбольших интегральных схемах (СБИС), то важным является совместимость одноэлектронных транзисторов с другой частью схемы (в первую очередь с усилителем). Важным преимуществом одноэлектронных транзисторов является возможность создания гибридных схем: одноэлектронный транзистор/ МОП-транзистор, а преимуществом КНИ-транзисторов разных конструкций – их совместимость с существующей кремниевой технологией.

При использовании современной нанолитографии на основе СТМ - литографии и литографии с использованием атомно-силового микроскопа (АСМ) представляется возможным получение наноприборов в виде релаксационных квантовых диодов (РКД) и релаксационных квантовых транзисторов (РКТ). Основным физическим эффектом, который обеспечивает работу РК-приборов, есть размерное квантование и релаксация неравновесных электронов. Для построения названных выше приборов необходимо получить твердотельные структуры с размерами, много меньшими, чем некоторые характерные длины. Среди важных параметров возможного нанолитографического процесса есть длина размерного квантования, равная [4]:

$$L_{dg} = \left[3\hbar^2 / 2m^* k_B T \right]^{1/2} \quad (1)$$

где $\hbar = h/2\pi$, h - постоянная Планка; m^* - эффективная масса электронов в объемном материале; k_B - постоянная Больцмана; T - абс. температура.

Путем изменения поперечных размеров квантовых линий можно выбирать концентрацию электронов, которые двигаются через переход между двумя квантовыми линиями с разной шириной. Возможны два варианта приборов, основанных на эффектах переноса неравновесных электронов в квантовых линиях. При этом коэффициент усиления по току достигает величин от 200 до 1000. Характерная емкость таких приборов достигает 0,1-0,2 мкф/см². Оценка по предельным частотам РКД и РКТ составляет 10¹³ Гц [2, 5].

Технологические процессы создания элементов наноструктур. Процесс квантования можно проиллюстрировать на примере одноэлектронного гетерослоя. Если источник напряжения заряжает конденсатор через обычный резистор, то заряд на конденсаторе строго пропорционален напряжению. При этом одна из сторон перехода формирует «островок», окруженный изоляционными материалами. В случае замены диэлектрика в конденсаторе туннельным переходом появляется возможность передавать напряжение на этот островок дискретно. Такой подход, приводящий к дискретному увеличению напряжения, инициирует возникновение т.н. «кулоновской лестницы».

В отличие от диаметра углеродных нанотрубок диаметр полупроводниковых нанотрубок прецизионно задается в диапазоне от 100 нм до 2 нм. Технология изготовления полупроводниковых нанотрубок стыкуется с технологией СБИС, что позволяет использовать ее в расчетах, проектировании и изготовлении базовых элементов нанoeлектроники, а потом и новых приборов нанoeлектроники и наномеханики.

Особенности использования технологических процессов формирования наноструктур. В основу метода по получению полупроводниковых нанобъектов с использованием GaAs положен способ выращивания тонкой напряженной гетеропленки толщиной до нескольких монослоев на плоской подложке, последующем ее освобождении от связи с подложкой и самосвертыванием в трубку. Процесс самосвертывания протекает за счет действия межатомных сил в напряженной пленке с использованием структур InAs/GaAs.

Ниже более детально приведем возможности создания технологических процессов формирования наноструктур и наноприборов на их основе путем переноса атомов металла в мощном электрическом поле.

Процесс формирования наноструктур при переносе атомов. Рассмотрим систему из тонкого острия и одноатомного слоя на полупроводниковой подложке между которыми действует внешняя разность потенциалов U . Представим головку острия в виде шара с радиусом R , центр которого находится на расстоянии A от поверхности слоя.

Известно, что в этой системе на слой атомов действует механическая сила плотностью

$$F_n = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 E_z^2}{2}. \quad (2)$$

где ε_0 и ε_1 – диэлектрические постоянные системы «вакуум – поверхностный слой»; E_z – суммарное значение нормальных составляющих электрического поля по обе стороны границы распределения.

Величина заряда на поверхности острия Q_0

в системе «острие-слой» может быть определена с помощью выражения:

$$Q_0 = CU_0 \quad (3)$$

где C – электрическая емкость системы «острие-слой», $U_0 = U + \Delta\varphi$, $\Delta\varphi = \varphi_\varepsilon + \varphi_C$ – контактная разность потенциалов между острием и слоем). Для нахождения C возможно воспользоваться предельными условиями распределения потенциала на поверхности острия [6]:

$$U_f(x, z) \Big|_{\substack{x=0 \\ z=A-R}} = U_0, \quad (4)$$

$$\text{откуда имеем: } C = \varepsilon_1 \left| -\frac{1}{R} + \frac{1}{2A-R} \right|. \quad (5)$$

Имея аналитическое выражение для потенциала $U(x, z)$, возможно найти нормальную составляющую электрического поля E_z [6]:

$$E_z(x, z) = -\frac{\partial U(x, z)}{\partial z} = \frac{CU_0}{\varepsilon_1} \left(\frac{A-z}{\sqrt{[x^2 + (A-z)^2]^3}} + \frac{A+z}{\sqrt{[x^2 + (A+z)^2]^3}} \right). \quad (6)$$

Использование устройства для изготовления наноструктур.

Устройство для изготовления наноструктур [7] содержит узел управления перемещением острия и содержит блок задания величины тока, а для обеспечения большой скорости управления туннельным током – быстродействующий ключ. Ключ выполнен в виде фотодиода, емкость которого сопоставима с емкостью системы «острие-подложка». Ток фотодиода задается оптическим излучением высокоскоростной оптической линии передачи импульсов. Конструктивно линия реализована в виде оптоволоконного световода, во входное окно которого вводится излучение лазера, а открытый конец которого контролирует фотодиод [8]. Величина тока зависит от мощности излучения лазера и потерей канала связи, а частота импульсов определяется частотой переключения лазера. Частота линий передачи может достигать десятков терагерц.

Выводы

1. Использование комбинированных комплексов в составе установок электронной и сканирующей туннельной литографий дает возможность получать образцы наноприборов, состоящих из наноструктур размером менее 10 нм, соответствующих нескольким десяткам атомных слоев.

2. При использовании такого технологического процесса необходима разработка устройств для управления свойствами наноструктур путем вариации геометрии и структурного состава элементов наноструктур.

3. Приведенный перечень основных технологических подходов по формированию наноструктур позволяет также говорить о значительных возможностях метода, в основу которого положен процесс сборки наноэлементов атом за атомом или молекула за молекулой с использованием явлений самоорганизации.

4. Создание электронного прибора нанометровых размеров может быть осуществлено путем сочетания технологии формирования наноструктур в системе «острие-подложка» и наличия узла управления для высокоскоростного построения задаваемых программно наноэлементов.

Литература

1. *Ходаковский Н.И., Золот А.И.* Использование баз данных кластерных структур при построении технологических процессов создания компонентов наноприборов. // V Международная научно-техническая конференция "Электроника и информатика – 2005", Москва – Зеленоград. 23-25.11.2005, С.337 – 238.
2. *Золот А.И., Ходаковский Н.И.* Исследование физико-технологических процессов формирования наноструктур для создания наноприборов и управления их свойствами // Управляющие системы и машины.- 2007, №1.- С. 48 – 52.
3. Патенты Украины: №№ UA39552, UA77015, UA90571.
4. *Обухов И.А.* О возможности применения СТМ-АСМ литографии для создания новых типов квантовых приборов // Микросистемная техника.- 2003, №6.- С.34-37.
5. *Обухов И.А.* Моделирование переноса заряда в мезоскопических структурах. Севастополь: «Вебер», 2005, - 226 с.
6. *Золот А.И., Ходаковский Н.И., Яворский И.А.* Модель процесса переноса атомов при формировании наноструктур. // V Международная научно-техническая конференция "Электроника и информатика – 2005", Москва – Зеленоград. 23-25.11.2005, С.20 – 21.
7. *Золот А.И., Ларкин С.Ю., Ходаковский М.И., Коржинский Ф.И., Мерзвинский П.А.* Пристрій для виготовлення наноструктур.- Патент України на винахід UA 80154 .- Бюл. №13, 2007 р.
8. *Вербицкий В.Г.* Ионные технологии в электронике.- К.: МП «Леся».- 2002.- 376 с.