

PACS numbers: 07.79.-v, 68.37.-d, 81.16.Rf, 81.16.Ta, 85.35.-p

## **Исследование зондовых методов получения элементов наноэлектронных приборов и технологии диагностики с использованием электростатической силовой микроскопии**

Н. И. Ходаковский, С. Ю. Ларкин, Г. Г. Галстян\*

*ГП «Государственный научно-исследовательский центр «Фонон»,  
ул. Довнар-Запольского, 2/20,  
03060 Киев, Украина*  
*\*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,  
бульв. Акад. Вернадского, 36,  
03680, ГСП, Киев-142, Украина*

В работе исследованы зондовые методы построения наноэлектронных приборов и их диагностики с использованием электростатической силовой микроскопии. Рассмотрены пути повышения информативности измерений распределений зарядов и потенциалов в процессе получения элементов наноструктур.

У роботі досліджено зондові методи побудови наноелектронних приладів та їх діагностики з використанням електростатичної силової мікроскопії. Розглянуто шляхи підвищення інформативності мірянй розподілів зарядів і потенціалів у процесі одержання елементів наноструктур.

Probe methods for nanoelectronic devices design and their diagnostics using electrostatic force microscopy are studied. The ways of increasing of information capability of measurements of the charge and potentials distributions in the process of formation of nanostructure elements are analysed.

**Ключевые слова:** зондовые методы, электростатическая силовая микроскопия, продольные кристаллы, наноэлектронные структуры, наноприборы.

*(Получено 25 ноября 2010 г.)*

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Вызывает очевидный интерес характер продольной проводимости кристаллов продольной структуры (КПС), а также связь проводи-

мости со структурными параметрами КПС. Более того, на настоящий момент практически отсутствует информация об особенностях формирования и электрических свойствах гетеропереходов в КПС, а также амплитуде потенциальных барьеров на границах раздела возможных структурных фаз. Точность сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) — базового метода нанотехнологии при исследовании топографических особенностей рельефа определяется калибровкой сканера в XYZ-направлениях и формой острия зонда. Процесс калибровки СЗМ-измерений рельефа, а также тестирование формы зонда достигается путем определения граничного латерального разрешения при использовании эталонов хорошо ориентированного пиролитического графита и подложки слюды.

Значительная информативность измерений распределений зарядов и потенциалов с помощью электростатической силовой микроскопии (ЭСМ) может быть использована в полной мере, поскольку соответствующие эталоны калибруются с использованием промышленных стандартов.

В работе ставилась задача исследовать возможности повышения информативности измерений с помощью ЭСМ для использования в процессе получения элементов наноструктур зондовыми методами. Также необходимо было выяснить степень влияния формирования КПС на электрические свойства гетеропереходов, а также амплитуду потенциальных барьеров на границах раздела возможных структурных фаз получаемых наноструктур. Решение задачи выполнялось путем измерения распределения зарядов и потенциалов в КПС с помощью экспериментальных образцов эталонов, которые должны иметь гладкий на нанометровом уровне топографический рельеф и резкие границы в рельефе потенциала.

## **2. ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ ПРОДОЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИБОРОВ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ**

Исследование кристаллов продольной структуры является эффективным подходом к формированию приборов наноэлектроники по технологии «снизу вверх», когда прибор мог бы собираться из отдельных заранее приготовленных элементов. Под КПС подразумеваются полупроводниковые сплошные стержни с диаметром менее 100 нм и длиной от сотен нм до нескольких микрон. КПС могут получаться с контролируемо изменяемыми электрическими свойствами и составом, как вдоль их оси, так и в поперечном направлении. Таким образом, КПС могут выступать в качестве специфических «строительных» блоков наноприборов и наноустройств. Это открывает путь в создании наноминиатюрных приборов и устройств, в связи с ожидающимся развитием возможностей традиционного подхода

«сверху вниз», реализуемого на объемных материалах за счет применения методов нанолитографии высокого разрешения. КПС имеют преимущество и перед аналогичными элементами, получаемыми методами нанолитографии. КПС получают ротовыми методами, что снижает их дефектность и позволяет придавать им более широкий спектр свойств. Ростовые методы получения КПС позволяют сильнее варьировать и лучше контролировать их ключевые свойства, как-то: химический состав, структуру, легирование и морфологию [1].

Работы по созданию КПС ведутся на протяжении последних лет, и в настоящее время достигнут значительный прогресс в развитии технологий их получения практически для всех полупроводниковых систем Si, III–V и II–VI [2–4]. Основная идея роста КПС состоит в избирательном росте ПКНС на поверхности подложки под «наномалым» бугорком металлического катализатора. Поставка материала для роста ПКНС осуществляется за счет его депозиции на поверхность из газовой фазы или методом молекулярно-пучковой эпитаксии с последующей диффузией в область роста под «шапочкой» катализатора. Данная технология за счет контроля работы источников депозиции материала позволяет контролируемо изменять химический состав КПС по его длине, а также осуществлять легирование нужного уровня и типа. Таким образом, появляется принципиальная возможность формирования в КПС встроенных гетеро и электрических переходов.

Уже получены индивидуальные КПС в полевых транзисторах, фотодетекторах и биохимических детекторах [5]. Для их успешного развития требуется многое и, в частности, создание новых диагностических методов контроля свойств КПС.

### **3. ВЛИЯНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КПС НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЕТЕРОПЕРЕХОДОВ, А ТАКЖЕ АМПЛИТУДУ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ БАРЬЕРОВ НА ГРАНИЦАХ РАЗДЕЛА ВОЗМОЖНЫХ СТРУКТУРНЫХ ФАЗ**

Характер продольной проводимости КПС, а также связь проводимости со структурными параметрами КПС, являются определяющими при определении процессов формирования КПС. Для этого необходима информация об особенностях формирования и свойствах электрических и гетеропереходов в КПС, а также амплитуде потенциальных барьеров на границах раздела возможных структурных фаз [6].

Возможны две геометрии применения КПС в приборных структурах: планарная и объемная. В первом случае выращенные КПС отделяются от ростовой подложки и укладываются на изолирующий слой, образуя необходимый для прибора рисунок.

В планарной геометрии оба окончания КПС имеют контакт с зара-

нее приготовленными планарными контактами на поддерживающей поверхности. В результате одновременно реализуется фиксация КПС и обеспечивается возможность их электрических исследований.

Особый интерес вызывает, однако, применение КПС, неотделенных от подложки. Прежде всего, потому, что в этом случае возникает возможность одновременного создания больших массивов наноприборов, а не нескольких за счет поштучного перенесения конкретных КПС.

В такой геометрии возникает проблема контакта к верхнему окончанию КПС для выборочной или полной проверки их электрических характеристик. Легко видеть, что техника электростатической силовой микроскопии предоставляет уникальные возможности для изучения электрических и структурных свойств КПС, вертикально растущих из подложки. Соответствующая информация может получаться путем изучения продольных вольтамперных характеристик (ВАХ) КПС. Для их получения зонд ЭСМ может быть прецизионно приведен в контакт с вершиной КПС даже малого диаметра, что позволит выполнять измерения на одиночном конкретном КПС. Вторым контактом будет являться подложка, на которой вырос КПС. На вершине КПС может сохраняться наностроек золота, который играл роль катализатора при росте КПС. Это может создать условия для омического контакта проводящего ЭСМ-зонда с КПС и позволит выявлять по получаемым ЭСМ ВАХ-данным информацию о внутреннем устройстве одиночных КПС [5].

#### **4. ПОЛУЧЕНИЕ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЗАРЯДОВ И ПОТЕНЦИАЛОВ В НАНОСТРУКТУРАХ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ**

Информация об измерениях распределений зарядов и потенциалов с помощью ЭСМ может быть в значительной мере использована при условии, когда соответствующие эталоны калибруются с использованием промышленных стандартов.

Для получения необходимых структур для калибровки ЭСМ-измерений могут быть использованы различные эталоны. Одномерный эталон имеет резкую ступеньку поверхностного потенциала, а также периодические комбинации двух ступеней тонких полос поверхностного потенциала разного знака.

Для калибровки измерений локального сопротивления растекания можно использовать скол полупроводниковой гетероструктуры с решеткой слоев различного легирования и толщины [6]. Разрешение измерений для реального зонда может быть определено экспериментально по отклику на резкую ступеньку в потенциале на поверхности тестового образца, а также с помощью численного моде-

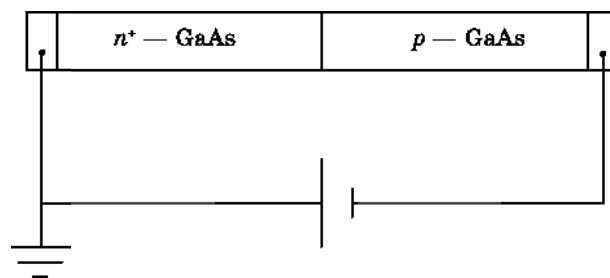


Рис. 1. Схема для калибровки ЭСМ-измерений.

лирования экспериментального отклика в режиме регистрации силы на ступенчатый перепад напряжения на участке скола образца GaAs, куда выходил ростовой  $p$ - $n$ -переход (рис. 1).

Было выполнено моделирование полученного результата. Для этого был применен относительно простой способ моделирования электростатического взаимодействия между зондом и поверхностью, рассмотренный в [7]. Для известной геометрии системы зонд–поверхность и распределения потенциалов на зонде и поверхности можно найти распределение зарядов на всех электродах, которое могло бы обеспечить заданное распределение потенциалов.

Решение задачи по распределению зарядов сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма относительно неизвестного распределения связанных зарядов. Определив распределение зарядов на электродах, уже нетрудно найти полную силу взаимодействия и соответствующие емкости между зондом и участками рассматриваемой поверхности, а также производные этих емкостей. Используя значения емкостей и их производных, а также значения потенциалов на необходимых участках образца, находится контактная разность потенциала [7]. Далее расчет последовательно повторяется для различных положений зонда вдоль необходимого направления на поверхности.

Для моделирования данных рассматривался образец, состоящий из двух бесконечных электродов с нулевым и единичным потенциалом, разделенных непроводящим зазором шириной 300 нм. Высокое согласование между экспериментом и вычислениями (рис. 2) было получено для модельного зонда согласно паспортным параметрам зонда, а именно: высота конусовидной пирамиды — 15 мкм, угол конусности — 22 градуса, радиус сопряженного с конусом сферического сегмента — 30 нм, что подтверждает корректность выбранного метода моделирования. Заметим, что и эксперимент, и моделирование демонстрируют расширение (примерно в два раза) профиля потенциала на  $p$ - $n$ -переходе при ЭСМ-измерениях в режиме регистрации силы [7, 8].

**Процесс формирования наноструктур в системе зонд–острие. Рас-**

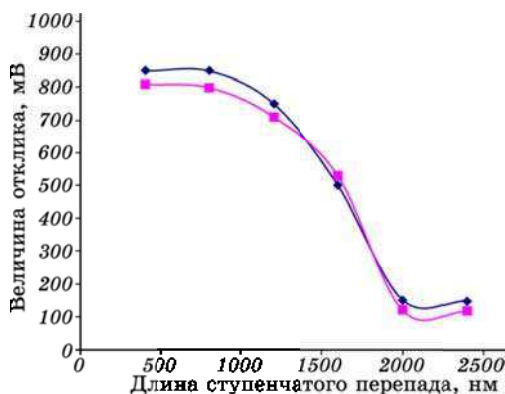


Рис. 2. Экспериментальный (■) и расчетный (◆) отклики ЭСМ на «ступенчатый» перепад напряжения в 1 В, который замыкает  $p$ - $n$ -переход.

смотрим систему из тонкого острия и одноатомного слоя на полупроводниковой подложке, между которыми действует внешняя разность потенциалов  $U$  в условиях вакуума. Представим головку острия в виде шара с радиусом  $R$ , центр которого находится на расстоянии  $A$  от поверхности слоя.

Известно, что в такой системе на шар действует механическая сила плотностью

$$F_n = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_1 E_z^2}{2}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0$  и  $\varepsilon_1$  — диэлектрические постоянные системы вакуум-поверхностный слой;  $E_z$  — суммарное значение нормальных составляющих электрического поля по обе стороны границы распределения.

Исходя из полученного значения суммарного заряда  $Q_0$  в системе зонд-подложка и учитывая, что  $Q_0 = CU_0$  (где  $C$  — электрическая емкость системы острие-шар,  $U_0 = U + \Delta\varphi$ ,  $\Delta\varphi = \varphi_{\text{ост.}} - \varphi_{\text{ш}}$  — контактная разность потенциалов между острием и шаром), можно определить величину  $C$ , воспользовавшись предельными условиями на поверхности шара:

$$U_f(x, z) \Big|_{\substack{x=0 \\ z=A-R}} = U_0, \quad (2)$$

откуда имеем:

$$C = \frac{\varepsilon_1}{\left| -\frac{1}{R} + \frac{1}{2A-R} \right|}. \quad (3)$$

Приведенные выше параметры модельного зонда были использованы для нахождения аппаратной функции зонда  $A(x)$ , которая определяется соотношением:

$$S^\theta(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(x-x')\theta(x')dx', \quad (4)$$

где  $S^\theta(x)$  — численно промоделированное распределение сигнала КРП,  $\theta(x)$  — истинное распределение потенциала на электродах образца в виде ступенчатой функции единичной высоты.  $A(x)$  вычисляется по отклику  $S^\theta(x)$ , как  $A(x) = -\frac{dS^\theta(x)}{dx}$ . Ширина  $A(x)$  на высоте контура составляет 160 нм, что приблизительно дает разрешение ЭСМ-измерений при выбранном расстоянии зонд–поверхность 20 нм.

## 5. ВЫВОДЫ

Использование КПС, не отделенных от подложки, для получения необходимых наноструктур может быть эффективным в том случае, когда применяются процессы одновременного создания больших массивов наноприборов, полученных зондовыми методами, а не поштучного перенесения отдельных КПС.

Однако при этом возникает необходимость учета контакта к верхнему окончанию КПС для выборочной или полной проверки их электрических характеристик. Можно отметить, что техника электростатической силовой микроскопии предоставляет уникальные возможности для изучения электрических и структурных свойств КПС, вертикально растущих из подложки.

Для калибровки измерений локального сопротивления растекания использовался скол полупроводниковой гетероструктуры с решеткой слоев различного легирования и толщины. Разрешающая способность измерений для реального зонда может быть определена экспериментально по отклику на резкую ступеньку в потенциале на поверхности тестового образца, а также с помощью численного моделирования экспериментального отклика в режиме регистрации силы на ступенчатый перепад напряжения.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Анкудинов, Н. А. Калюжный, В. М. Лантратов и др., *Материалы IX российско-украинского семинара «Нанопизика и наноэлектроника»* (Санкт-Петербург: 2008), с. 123.
2. Н. О. Jacobs, P. Leuchtman, O. J. Homan, and A. Stemmer, *J. Appl. Phys.*, **84**: 112 (1998).

3. R. P. Lu, K. L. Kavanagh, St. J. Dixon-Warren et al., *J. Vac. Sci. Technol.*, **B19**: 204 (2001).
4. R. P. Lu, K. L. Kavanagh, St. J. Dixon-Warren et al., *J. Vac. Sci. Technol.*, **B20**: 152 (2002).
5. A. V. Ankudinov and A. N. Titkov, *Phys. Solid State*, **47**: 205 (2005).
6. A. V. Ankudinov, M. S. Dunaevski, A. N. Titkov et al., *Physics of the Solid State*, **42**, No. 10: 521 (2000).
7. А. И. Золот, Н. И. Ходаковський, *Управляющие машины и системы*, № 1: 71 (2007).
8. М. І. Ходаковський, А. І. Золот, С. Ю. Ларкін, П. А. Мержвинський, Ф. Й. Коржинський, М. П. Шкляр, *Пристрій для контролю формування нанорозмірних структур*: Патент UA № 77015 (Бюл. про винаходи України, № 11) (2006).