

тами диффузии. В кремниевых переходах при декорировании дислокаций металлическими примесями наблюдалось увеличение токов утечки вплоть до короткого замыкания  $p$ - $n$ -перехода [6].

В настоящее время существует лишь качественное объяснение результатов экспериментов, в которых увеличение токов утечки связывается с образованием по дислокациям «мостиков» повышенной проводимости через область пространственного заряда  $p$ - $n$ -перехода. Оценки [7] дают сопротивления этих «мостиков» от 20 МОм до нескольких Ом. Эта интерпретация опирается на известный факт стекания примеси к дислокациям.

Наиболее распространенное объяснение влияния дислокаций на токи утечки основывается на исследованиях, в которых показано, что дислокация в кремнии  $n$ -типа ведет себя как цепочка акцепторов, а в  $p$ -кремнии – как цепочка доноров. Поэтому из условий электронейтральности дислокация должна образовывать вокруг себя трубку повышенной концентрации основных носителей заряда [6].

Таким образом, можно предположить, что наблюдаемое нами уменьшение токов утечки в диодах, изготовленных по трехшаговой технологии имплантации по сравнению с диодами стандартной технологии имплантации, обусловлено снижением плотности дислокаций в области  $p$ - $n$ -перехода и сопровождающим его уменьшением концентрации генерационно-рекомбинационных центров. Подавление образования остаточных нарушений посредством пошаговой имплантации бора обеспечивает повышение процента выхода годных изделий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Челябинский А. Р., Комаров Ф. Ф. // УФН. 2003. Т. 173. № 8. С. 813–846.
2. Плебанивич В. И., Белоус А. И., Челябинский А. Р., Оджеев В. Б. // ФТТ. 2008. Т. 50. Вып. 8. С. 1378–1382.
3. Плебанивич В. И., Челябинский А. Р., Васильев Ю. Б. и др. // Микроэлектроника. 2008. Т. 37. № 3. С. 213–218.
4. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир. 1984. Т. 1. С. 455.
5. Liefting R. et al. // IEEE Trans. Electron Dev. 1994. Vol. ED-41. P. 50–57.
6. Сорокин Ю. Г. // Тр. Всес. электротехнического института. 1980. № 90. С. 91–101.
7. Plantinga G. H. // IEEE Trans. Electron Devices. 1969. Vol. 16. № 4. P. 394–400.

## ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО КВАНТОВАНИЯ НА ВАХ ОДНОЭЛЕКТРОННЫХ СТРУКТУР

И. И. Абрамов, А. Л. Баранов,  
А. М. Лавринович, И. В. Пыжик

*Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники, nanodev@bsuir.edu.by*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений в наноэлектронике является разработка и исследование одноэлектронных приборных структур [1]. С уменьшением размеров этих структур становится важным учет пространственного квантования. В литературе, однако, существует противоречивое мнение по данному вопросу. С одной стороны, оценки показывают [2], что в большинстве случаев для металлических одноэлек-

тронных структур при моделировании можно не учитывать дискретность спектра электродов и островков. С другой стороны, экспериментальные исследования свидетельствуют, что при малых размерах островков влияние дискретности уровней может быть важным [1].

Целью работы является исследование влияния пространственного квантования на островках на вольт-амперные характеристики (ВАХ) рассматриваемого типа приборов с помощью предложенных моделей.

## 2. МОДИФИЦИРОВАНИЕ МОДЕЛИ

Для моделирования одноэлектронных приборных структур были предложены физико-топологические модели [3–6]. Исходные данные моделей – параметры материалов и конструкции приборов, что является их главным достоинством по сравнению с традиционно используемыми электрическими моделями [1]. Рассмотрим модификацию разработанных физико-топологических моделей на случай учета пространственного квантования на островках.

Анализируемый прибор представляется в виде принципиальной структурной схемы одноэлектронных цепочек (см. рис. из [1]). Для нахождения электростатического потенциала решается уравнение Пуассона в двумерном случае [3]. Заряд в диэлектрике не учитывается. При его решении используются численные методы, описанные в [3].

Для расчета ВАХ могут применяться либо метод Монте-Карло [6], либо основное уравнение (master equation) одноэлектроники [1, 3], но записанное не для скоростей туннелирования, а непосредственно для токов через отдельные туннельные переходы.

Парциальные токи вычисляются исходя из значений напряжений на туннельных переходах согласно формулам (1), (2) из [6]. При этом учитываются не только результаты расчетов распределения электростатического потенциала в структуре, но и пространственное квантование на островках. Для расчета уровней энергии в данной работе использовалось решение стационарного уравнения Шредингера в приближениях прямоугольной и параболической квантовой ямы островков.

Сопротивления туннельных переходов истока и стока вычисляются исходя из вероятностей переноса носителей заряда через эти переходы, которые в свою очередь рассчитываются с привлечением квазиклассического приближения Вентцеля – Крамерса – Бриллюэна [3]. При этом высоты потенциального барьера над уровнем Ферми пересчитываются так же, как и напряжения на туннельных переходах, с учетом пространственного квантования на островках.

Программы, реализующие предложенные модифицированные модели, были включены в систему моделирования нанoeлектронных приборов NANODEV [7], предназначенную для персональных ЭВМ.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве примера на рис. 1 приведены результаты расчета ВАХ одноэлектронной структуры с 20 островками статьи [8] при комнатной температуре. Эти результаты и другие наши исследования показывают, что, несмотря на качественное совпадение рассчитанных ВАХ в случае учета и неучета пространственного квантования на островках, количественные различия по токам прибора могут быть значительными и достигать 30 % и более с ростом смещений.

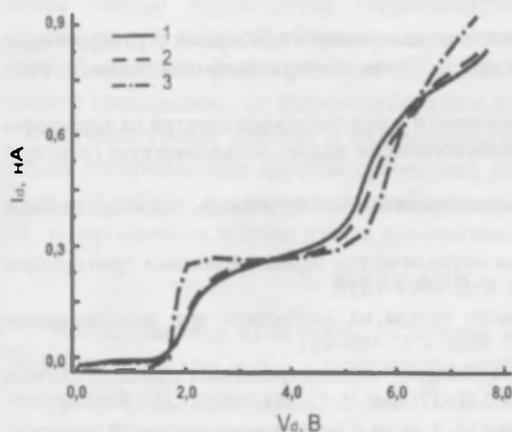


Рис. 1. ВАХ структуры на основе  $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ :  
 1 – расчет без учета пространственного квантования;  
 2 – расчет с учетом пространственного квантования;  
 3 – экспериментальные данные работы [8]

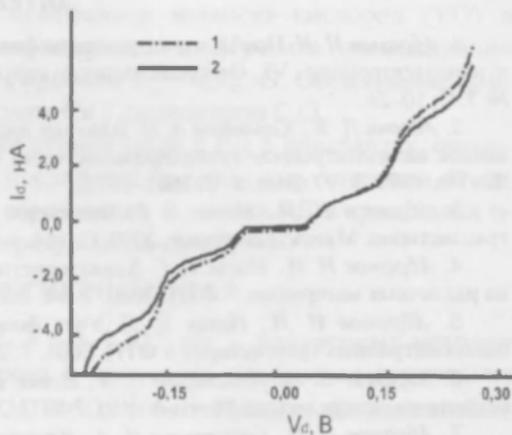


Рис. 2. ВАХ структуры на основе  $\text{TlBa}_2(\text{Ca}_{0.8}\text{Y}_{0.2})\text{Cu}_2\text{O}_7$ :  
 1 – экспериментальные данные работы [9];  
 2 – расчет с учетом пространственного квантования (параболическая квантовая яма)

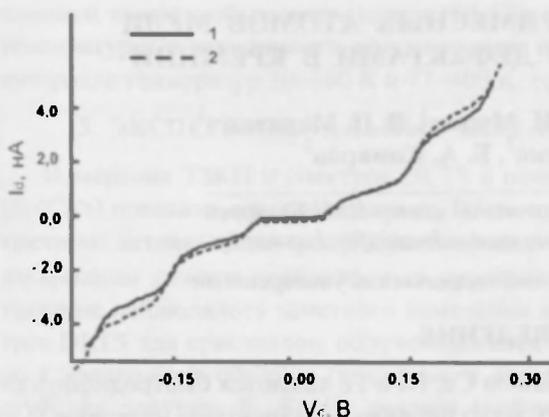


Рис. 3. ВАХ структуры на основе  $\text{TlBa}_2(\text{Ca}_{0.8}\text{Y}_{0.2})\text{Cu}_2\text{O}_7$ :  
 1 – расчет с учетом пространственного квантования (параболическая квантовая яма);  
 2 – расчет с учетом пространственного квантования (прямоугольная квантовая яма)

ВАХ структуры на пленке  $\text{TlBa}_2(\text{Ca}_{0.8}\text{Y}_{0.2})\text{Cu}_2\text{O}_7$  работы [9] при  $T = 9.8 \text{ K}$  приведены на рисунке 2. Размер островков  $5 \text{ nm} \times 5 \text{ nm}$ . Как следует из рис. 2, результаты расчета по предложенной модели хорошо согласуются с экспериментальными данными. Для сравнения на рис. 3 приведены результаты моделирования для двух различных приближений.

Видно, что отличия становятся более сильными в характеристиках с ростом смещений и в случаях использования приближений прямо угольной и параболической квантовой ямы островков.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, пространственное квантование может оказывать все более сильное влияние на ВАХ одноэлектронных приборных структур с ростом прикладываемых смещений и числа островков для их размеров, когда, согласно оценкам [2], этого происходить не должно было бы. С ростом смещений может быть важно и приближение, используемое для формы квантовой ямы островков. В рассмотренных случаях, как свидетельствуют расчеты, начинает сказываться даже небольшое различие в значениях уровней энергии островков.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамов И. И.* Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и нанoeлектроники. VI. Одноэлектронные структуры // Пано- и микросистемная техника. 2007. № 7. С. 10–24.
2. *Аверин Д. В., Коротков А. Н.* Влияние дискретности энергетического спектра на коррелированное одноэлектронное туннелирование через мезоскопически малую металлическую гранулу // ЖЭТФ. 1990. Т. 97. Вып. 5. С. 1661–1673.
3. *Абрамов И. И., Новик Е. Г.* Численное моделирование металлических одноэлектронных транзисторов. Минск: Бестпринт, 2000. С. 164.
4. *Абрамов И. И., Новик Е. Г.* Характеристики металлических одноэлектронных транзисторов на различных материалах // ФТП. 2000. Т. 34. Вып. 8. С. 1014–1019.
5. *Абрамов И. И., Новик Е. Г.* Учет фонового заряда на «островке» при моделировании одноэлектронных транзисторов // ФТП. 2001. Т. 35. Вып. 4. С. 489–491.
6. *Абрамов И. И., Игнатенко С. А., Новик Е. Г.* Модель многоостровковых одноэлектронных цепочек на основе метода Монте-Карло // ФТП. 2003. Т. 37. Вып. 5. С. 583–587.
7. *Абрамов И. И., Гончаренко И. А., Игнатенко С. А.* и др. Система моделирования нанoeлектронных приборов – NANODEV // Микроэлектроника. 2003. Т. 32. Вып. 2. С. 124–133.
8. *Kimura Y., Itoh K., Yamaguchi R.-i.* et al. Room-temperature observation of a Coulomb blockade phenomenon in aluminum nanodots fabricated by an electrochemical process // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 90. № 9. P. 093119–1–3.
9. *Miller T. G., Reifinberger R.* Three-tunnel-capacitor model for single-electron tunneling in layered thin films // Phys. Rev. B. 1994. Vol. 50. № 5. P. 3342–3349.

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ МЕДИ С РАДИАЦИОННЫМИ ДЕФЕКТАМИ В КРЕМНИИ

**И. Ф. Медведева<sup>1</sup>, Л. И. Мурин<sup>1</sup>, В. П. Маркевич<sup>1</sup>,  
А. Г. Литвинко<sup>2</sup>, Б. А. Комаров<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси  
по материаловедению», [medvedeva@iftp.bas-net.by](mailto:medvedeva@iftp.bas-net.by)

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Примесные атомы переходных металлов Cu, Ni и Fe являются быстродиффундирующими в кристаллах кремния и могут легко проникать в структуры на основе Si из внешней среды [1, 2]. Эти примеси считаются опасными в технологии производства приборов на основе Si, так как обладают достаточно высокой растворимостью и ответственны за образование ряда электрически активных дефектов в кристаллах Si. В работах [3–5] предполагалось, что примеси переходных металлов могут быть ответственными за ускоренный отжиг радиационных дефектов (РД) и формирование новых электрически активных комплексов в облученных кристаллах Si.

Ранее взаимодействие примесных атомов Cu с РД в Si исследовалось методом DLTS [6, 7]. Использовались барьеры Шоттки, созданные путем осаждения Cu на кристаллы Si *n*- и *p*-типа, облученные либо электронами с энергией 2 МэВ [6, 7], либо протонами и  $\alpha$ -частицами [7]. Во всех случаях была обнаружена аномально высокая скорость отжига дивакансий ( $V_2$ ) при температурах ниже 150 °С. Предполагалось, что это связано с пассивацией  $V_2$  атомами Cu. Авторами [6, 7] отмечалась и