

## **Проведение научных экспериментов в нанотехнологиях**

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов  
по университетскому политехническому образованию в качестве  
учебного пособия для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлениям «Конструирование и технология  
электронных средств» (211000), «Нанотехнология» (152200),  
«Радиотехника» (210400)*

Под редакцией В.А. Шахнова



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО

МГТУ им. Н. Э. Баумана

2015

УДК 621.3.049.77

ББК 32.852

П78

Издание доступно в электронном виде на портале *ebooks.bmstu.ru*  
по адресу: <http://ebooks.bmstu.ru/catalog/244/book1040.html>

Факультет «Информатика и системы управления»  
Кафедра «Конструирование и производство  
электронной аппаратуры»

Авторы:

*А. А. Адамова, В. М. Башков, А. И. Власов, А. А. Жуков,  
Д. В. Козлов, Е. В. Кульгашов, Ю. М. Миронов, Е. В. Резчикова,  
В. А. Соловьев, В. А. Шахнов, В. М. Школьников*

Рецензенты:

д-р техн. наук *Л. В. Соколов,*  
д-р техн. наук *Ю. В. Панфилов*

**Проведение научных экспериментов в наноинженерии :**  
П78 учебное пособие / А. А. Адамова и др. ; под ред. В. А. Шахнова. —  
Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. — 129, [3] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4141-9

Учебное пособие содержит материалы о методах формирования и исследования микро- и наноструктур. Основное внимание уделено лабораторному практикуму по наукоемким технологиям микро- и нанoeлектроники.

Для студентов, обучающихся по направлениям «Конструирование и технология электронных средств» (211000), «Наноинженерия» (152200), «Радиотехника» (210400).

УДК 621.3.049.77  
ББК 32.852

ISBN 978-5-7038-4141-9

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015  
© Оформление. Издательство  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015

## Предисловие

В условиях современного технического прогресса в области микроэлектроники и бурного развития нано- и микросистемной техники оперирование традиционными характеристиками электронных изделий, проектными нормами и параметрами технологических процессов прошлого времени становится основным сдерживающим фактором.

В эру NBIC-технологий (нано- (Nano-), био- (Bio-), информационных (Information), когнитивных (Cognitive) технологий) особую роль приобретают исследования в области бионанотехнологий, информатики, вычислительной техники и радиоэлектроники. Только переход на проектные нормы элементов наноэлектроники ( $10^{-9} \dots 10^{-10}$  м) может обеспечить динамичное развитие большинства отраслей промышленности.

Для создания наноэлектронных устройств сегодня используется достаточно широкая экспериментально-технологическая база, в том числе:

- молекулярно-лучевая эпитаксия;
- осаждение тонких пленок из газовой фазы;
- ионно-лучевые процессы;
- ионно-плазменные процессы;
- вакуумные процессы и др.

Основным материалом микро- и наноэлектроники пока остается кремний (монокристаллический, поликристаллический, пористый и аморфный).

Активно развиваются исследования в области микро- и нанотехнологий, связанные с биомедициной, разработкой и производством сенсоров и систем обработки сигналов. Исследованию физических принципов измерения различных характеристик материалов посвящено большое число работ. В 2011 г. в рамках Федеральной целевой программы «Развитие нанотехнологий» Калужским филиалом МГТУ им. Н.Э. Баумана была выпущена серия

книг «Библиотека нанотехнологий», в которой был обобщен ранее накопленный опыт проведения научных экспериментов в микро- и нанотехнологии и представлен методический базис реализации образовательных программ по наукоемким технологиям микро- и нанотехнологии. Однако до сих пор, несмотря на развитие технологических возможностей и совершенствование технического парка оборудования, сохраняется острая потребность в дальнейшем развитии практической составляющей образовательных программ, реализации прикладных лабораторных практикумов с использованием инфраструктуры нанотехнологических кластеров и ресурсных центров.

В данном учебном пособии приведено краткое изложение базовых теоретических материалов и обобщение методик проведения научных экспериментов в нанотехнологии.

Также рассмотрены вопросы, связанные с практической инженерной подготовкой в области наукоемких технологий микро- и нанотехнологии. В нем успешно сочетаются многолетний опыт подготовки инженеров и новые методы передачи знаний, в которых особое внимание уделяется практическим методам обучения. Обобщение и систематизация базовых методов экспериментальных исследований в сочетании с практическими примерами позволяют наглядно иллюстрировать возможности микро- и нанотехнологий.

Для самостоятельной теоретической подготовки к лабораторному практикуму рекомендуется использовать учебно-методические комплексы серии «Библиотека нанотехнологий» (17 томов), изданные в 2011 г. Калужским филиалом МГТУ им. Н.Э. Баумана.

# **1. ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОНЕОДНОРОДНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ И РЕЗИСТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

## **1.1. Электропроводность кремния**

Монокристаллический кремний — традиционный материал микроэлектроники, который характеризуется целым рядом уникальных свойств (высокая механическая прочность, добротность, теплопроводность, отсутствие усталостных эффектов). В последнее время кремний становится основным материалом, применяемым при изготовлении микроэлектронно-механических систем (МЭМС). Это обстоятельство требует более глубокого исследования кремния и особенно — выявления микронеоднородностей электропроводности по длине слитка, его торцам и пластинам.

Кремний относится к классу веществ, значение электропроводности которых изменяется в широком диапазоне между значениями электропроводности металлов и диэлектриков.

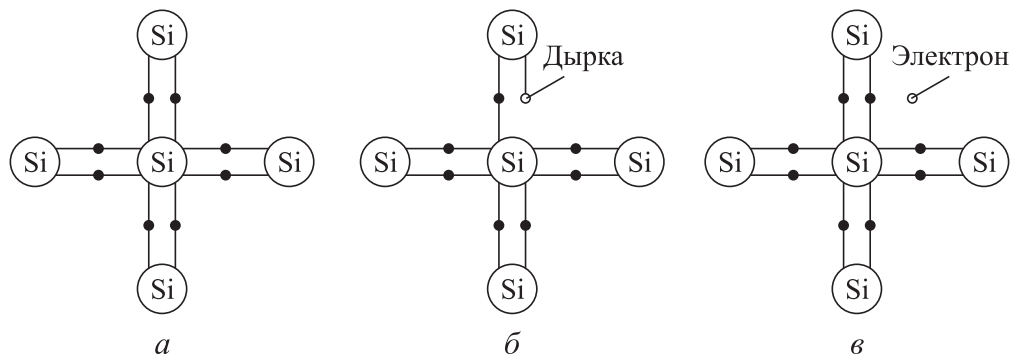
В кристаллической решетке кремния каждый атом связан с четырьмя ближайшими соседями парными ковалентными связями (рис. 1.1, *а*). При комнатной температуре часть этих связей разрывается, и освобождающиеся электроны и дырки перемещаются по кристаллу в противоположные стороны. Число электронов в собственном кремнии равно числу дырок. При комнатной температуре оно весьма мало ( $10^{10}$ ) по сравнению с числом атомов ( $10^{23}$ ) в  $1\text{ см}^3$ .

Наличие примесей элементов 3-й и 5-й групп Периодической таблицы Д.И. Менделеева (рис. 1.1, *б*, *в*) приводит к появлению в решетке кремния избыточных дырок и электронов. Под воздействием электрического поля электроны и дырки перемещаются. Их скорость — скорость дрейфа носителей заряда в электрическом поле

напряженностью 1 В/см — называют подвижностью и обозначают буквой  $\mu$ . Подвижность различна для электронов ( $\mu_n$ ) и дырок ( $\mu_p$ ). Удельная электропроводность определяется выражением

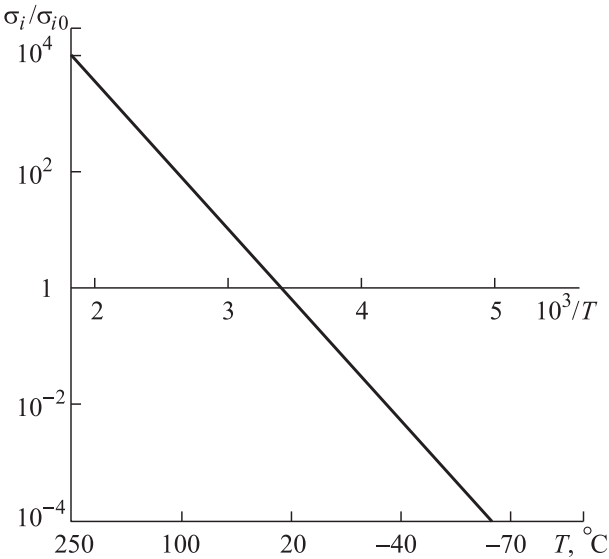
$$\sigma = q_n \mu_n + q_p \mu_p,$$

где  $q$  — заряд электрона,  $q = 1,60 \cdot 10^{-19}$  Кл.



**Рис. 1.1.** Структура кремния:

*a* — кремний с собственной проводимостью; *б* — кремний *p*-типа; *в* — кремний *n*-типа



**Рис. 1.2.** Зависимость относительной удельной электропроводности собственного кремния от температуры ( $\sigma_{i0}$  — электропроводность при температуре +20 °С)

В практической деятельности удобнее оперировать удельным сопротивлением  $\rho = 1/\sigma$  Ом·см. У кремния оно может изменяться в диапазоне  $10^{-4} \dots 10^6$  Ом·см. Для собственного кремния число

электронов равно числу дырок ( $n = p = n_i$ ), следовательно,  $\sigma_i = qn_i = (\mu_n + \mu_p)$ .

Температурная зависимость собственной проводимости кремния определяется температурной зависимостью собственной концентрации  $n_i$ . Эта зависимость очень сильная (экспоненциальная). На рис. 1.2 представлена зависимость  $\sigma_i/\sigma_{i0}$  от температуры (в полупологарифмическом масштабе).

## **1.2. Влияние разброса значений удельного сопротивления на качество и выход годных изделий**

Разброс значений параметров и выхода годных электронных изделий всегда был связан с разбросом значений удельного сопротивления кремния. Эта связь становилась все более тесной по мере уменьшения проектных норм элементов микросхем, и сегодня это особенно заметно.

При достигнутом уровне проектных норм ( $\leq 0,1$  мкм) усреднение значений удельного сопротивления стало приводить к снижению качества и выхода годных изделий. Это обусловлено в первую очередь тем, что даже незначительное нарушение условий кристаллизации кремния из жидкой фазы приводит к возникновению каналов (тонких микрообластей, соизмеримых с элементами транзисторов), удельное сопротивление в которых в 1,5–2,0 раза ниже среднего значения. Такой разброс значений сопротивления приводит к снижению напряжения пробоя, потере качества и уменьшению выхода годных изделий.

## **1.3. Зондовые методы измерения удельного сопротивления**

В 1954 г. Л.Б. Вальдесом (L.B. Valdes) впервые была исследована возможность использования четырехзондового метода для измерения сопротивления германия. С тех пор этот метод является основным методом контроля монокристаллических полупроводниковых материалов. Схема измерения удельного сопротивления четырехзондовым методом представлена на рис. 1.3.

## Оглавление

|                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Предисловие .....                                                                                                                                                                    | 3  |
| 1. Исследование микронеоднородности и температурных коэффициентов сопротивления кремния и резистивных материалов .....                                                               | 5  |
| 1.1. Электропроводность кремния .....                                                                                                                                                | 5  |
| 1.2. Влияние разброса значений удельного сопротивления на качество и выход годных изделий .....                                                                                      | 7  |
| 1.3. Зондовые методы измерения удельного сопротивления .....                                                                                                                         | 7  |
| 1.4. Омические контакты и способ их создания .....                                                                                                                                   | 8  |
| 1.5. Метод тестового контроля микронеоднородности сопротивления монокристаллического кремния .....                                                                                   | 9  |
| 1.6. Производство поли- и монокристаллического кремния и кремниевых пластин .....                                                                                                    | 10 |
| 1.7. Изготовление кремниевых пластин .....                                                                                                                                           | 14 |
| Лабораторный практикум к главе 1 .....                                                                                                                                               | 18 |
| <i>Работа 1.1.</i> Исследование микронеоднородности сопротивления по длине (образующей) слитка монокристаллического кремния .....                                                    | 18 |
| <i>Работа 1.2.</i> Исследование микронеоднородности сопротивления по торцам слитков (пластин) монокристаллического кремния ....                                                      | 21 |
| <i>Работа 1.3.</i> Исследование зависимости удельной электропроводности монокристаллического примесного кремния от температуры в диапазоне 20...100 °С .....                         | 22 |
| <i>Работа 1.4.</i> Исследование микронеоднородности сопротивления резистивного сплава РС 3710 и кермета К-50С в виде тонких пленок на ситалловой подложке .....                      | 24 |
| <i>Работа 1.5.</i> Исследование температурной зависимости удельной электропроводности резистивных материалов РС-3710 и кермета К-50С в диапазоне 20...100 °С .....                   | 26 |
| 2. Исследования методов контроля толщины, топографии, структуры, дефектности, элементного состава поверхностей тонких пленок и процессов формирования профилированных структур ..... | 28 |
| 2.1. Исследование толщины аморфных пленок диоксида кремния ....                                                                                                                      | 28 |
| 2.2. Исследование толщины тонких пленок поликристаллического кремния .....                                                                                                           | 33 |
| 2.3. Исследование толщины аморфных пленок нитрида кремния .....                                                                                                                      | 35 |

|                                                                                                                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.4. Методы исследования топографии и структуры поверхности тонких пленок на примере пленок алюминия для систем генерации, передачи и обработки информации в нано- и микроэлектронно-системной технике ..... | 36  |
| 2.5. Средства исследования топографии и структуры поверхности тонких пленок .....                                                                                                                            | 61  |
| 2.6. Методы исследования дефектности и элементного состава поверхности на примере тонких пленок алюминия .....                                                                                               | 66  |
| 2.7. Методы исследования процессов формирования профилированных полупроводниковых и диэлектрических структур .....                                                                                           | 74  |
| Лабораторный практикум к главе 2 .....                                                                                                                                                                       | 87  |
| <i>Работа 2.1.</i> Измерение толщины аморфных пленок диоксида кремния .....                                                                                                                                  | 87  |
| <i>Работа 2.2.</i> Измерение толщины тонких пленок поликристаллического кремния .....                                                                                                                        | 88  |
| <i>Работа 2.3.</i> Измерение толщины аморфных пленок нитрида кремния .....                                                                                                                                   | 88  |
| <i>Работа 2.4.</i> Исследование топографии и структуры поверхности тонких пленок алюминия в технологии формирования слоя пористого анодного оксида $Al_2O_3$ .....                                           | 89  |
| <i>Работа 2.5.</i> Исследование дефектности и элементного состава поверхности тонких пленок алюминия в технологии формирования слоя пористого анодного оксида $Al_2O_3$ .....                                | 98  |
| <i>Работа 2.6.</i> Исследование процессов формирования профилированных полупроводниковых и диэлектрических структур .....                                                                                    | 112 |
| Литература .....                                                                                                                                                                                             | 120 |
| <i>Приложение.</i> Материалы и параметры настройки процесса магнетронного напыления .....                                                                                                                    | 122 |