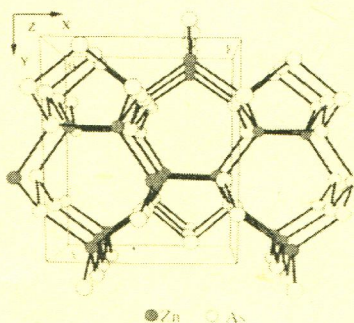
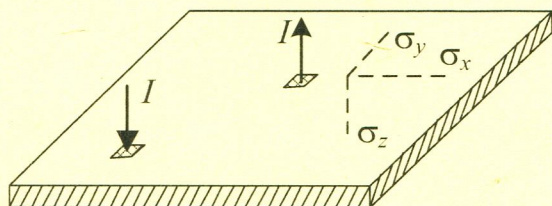
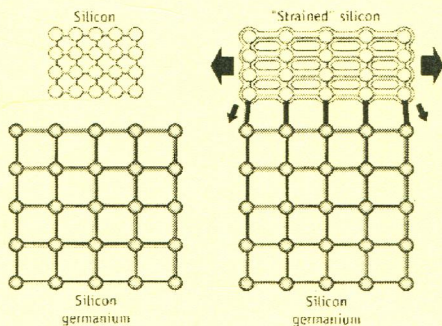


В.В. Филиппов

# ОСОБЕННОСТИ ЯВЛЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОГО ПЕРЕНОСА В АНИЗОТРОПНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ



$ZnAs_2$



«strained» Si



Москва 2015

**В.В. Филиппов**

**Особенности явлений  
электронного переноса  
в анизотропных полупроводниках**

*Монография*



Москва 2015

УДК 537.311.322  
ББК 22.379  
Ф 53

**Рецензенты:**

доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры физики и биомедицинской техники  
Липецкого государственного технического университета  
*В.Ф. Осинин;*

доктор технических наук, профессор кафедры электроники  
телекоммуникаций и компьютерных технологий  
Липецкого государственного педагогического университета  
*В.Н. Малыш*

**Филиппов В.В.**

Ф 53

Особенности явлений электронного переноса в анизотропных полупроводниках: монография. – М.: Издательство «Спутник +», 2015. – 259 с.

ISBN 978-5-9973-3592-2

Получены выражения для распределения потенциала, позволившие исследовать особенности распределения электрического поля и протекания тока в средах с анизотропией проводимости. Изложены методы измерений удельной электропроводности, коэффициента Холла, подвижности и концентрации носителей заряда в анизотропных полупроводниковых материалах. Приводится анализ эффектов Холла и Гаусса в анизотропных полупроводниках. Рассмотрено моделирование физических свойств отдельных наноструктур электроники.

Для научных работников, инженеров и аспирантов, занимающихся исследованием полупроводников, а также студентов старших курсов физических и инженерно-физических направлений подготовки.

УДК 537.311.322  
ББК 22.379

Отпечатано с готового оригинал-макета.

ISBN 978-5-9973-3592-2

© Филиппов В.В., 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	7
<b>Глава 1. Особенности явлений электронного переноса в полупроводниковых монокристаллах и пленках с анизотропией проводимости</b> .....	9
1.1. Явления электронного переноса в анизотропных токопроводящих средах и методы их исследования (обзор литературы).....	9
1.2. Распределение электрического потенциала в анизотропных полупроводниковых пленках.....	12
1.2.1. Распределение электрического потенциала в неограниченных анизотропных пленках .....	12
1.2.2. Распределение потенциала в ограниченных анизотропных полупроводниках, вырезанных вдоль кристаллографических осей .....	17
1.2.3. Распределение потенциала в анизотропных полупроводниках, вырезанных под углом к кристаллографическим осям.....	21
1.3. Расчет распределения потенциала в объемных анизотропных полупроводниковых кристаллах .....	26
1.3.1. Распределение потенциала токового зонда к анизотропному проводящему полупространству.....	26
1.3.2. Расчет электрического потенциала в прямоугольных образцах...	30
1.3.3. Распределение потенциала в анизотропных дисках и шайбах.....	34
1.4. Особенности растекания электрического тока и распределения потенциала в ограниченных анизотропных полупроводниках.....	36
1.4.1. Компьютерное моделирование распределений электрического поля и линий тока в анизотропных полупроводниках.....	36
1.4.2. Анализ распределения электрического поля в анизотропных полупроводниках.....	44
1.4.3. Влияние анизотропии на сопротивление растекания в ограниченных полупроводниках.....	48
1.5. Моделирование электрических полей в слоистых полупроводниковых структурах.....	54
1.5.1. Электрическое поле токового зонда к слоистой полупроводниковой пленке.....	54
1.5.2. Моделирование электрических полей в слоистых анизотропных полупроводниковых структурах.....	59
1.6. Экспериментальная проверка теоретических расчетов .....	64
<b>Глава 2. Макроскопическая модель эффектов Холла и магнетосопротивления в анизотропных полупроводниках</b> .....	69
2.1. Экспериментальные и теоретические методы исследования гальваномагнитных явлений в полупроводниках (обзор литературы).....	69
2.1.1. Гальваномагнитные явления в полупроводниках и экспериментальные методы их исследования.....	69

2.1.2. Решение краевой задачи Неймана с неоднородными граничными условиями для эффекта Холла в изотропных полупроводниках .....	72
2.2. Макроскопическая теория эффектов Холла и Гаусса в анизотропных полупроводниках.....	77
2.2.1. Теоретический расчет распределения потенциала в ограниченных анизотропных полупроводниках при наличии внешнего магнитного поля.....	77
2.2.2. Эффекты Холла и Гаусса в анизотропных кристаллах и пленках, вырезанных под углом к кристаллографическим осям.....	82
2.3. Компьютерное моделирование электрического поля в ограниченных анизотропных полупроводниках при наличии внешнего магнитного поля.....	85
2.4. Разработка методов исследования эффектов Холла и магнетосопротивления в анизотропных полупроводниках .....	89
2.4.1. Определение компоненты тензора коэффициента Холла в анизотропных полупроводниках, вырезанных вдоль кристаллографических осей .....	89
2.4.2. Особенности исследования эффекта Холла в анизотропных полупроводниках, вырезанных под углом к кристаллографическим осям	93
2.4.3. Методика исследования величины магнетосопротивления в ограниченных анизотропных полупроводниках .....	95
2.4.4. Измерение магнетосопротивления при расположении контактов на периметре образцов .....	96
2.5. Распределение электрических полей при холловских измерениях в анизотропных полупроводниковых кристаллах.....	98
2.6. Экспериментальная проверка. Практические рекомендации.....	103
2.6.1. Исследования эффектов Холла и Гаусса в изотропных полупроводниках.....	103
2.6.2. Экспериментальные данные по исследованию эффекта Холла и Гаусса в анизотропных полупроводниках.....	104

**Глава 3. Разработка и теоретическое обоснование методов исследования свойств анизотропных и неоднородных полупроводниковых структур .....**

3.1. Контактные методы исследования кинетических свойств полупроводников (обзор литературы) .....	109
3.1.1. Значение свойств контактов металл-полупроводник в электронике .....	109
3.1.2. Зондовые методы исследования полупроводниковых материалов	110
3.2. Получение и исследование свойств никелевых контактов к полупроводниковым материалам.....	113
3.2.1. Капельный метод электрохимического осаждения контактов металл-полупроводник и исследование их свойств.....	113
3.2.2. Определение сопротивления металлических контактов на кремнии.....	118

3.3. Измерение сопротивления контактов металл-полупроводник и контроль удельного сопротивления полупроводниковых пленок.....	121
3.3.1. Теоретическое обоснование методики определения сопротивления контактов к бесконечной полупроводниковой пленке.....	121
3.3.2. Оценка учета влияния размера токовых контактов и наличия границ.....	125
3.3.3. Экспериментальная проверка и апробация методики.....	129
3.4. Контроль электропроводности полупроводниковых образцов в виде шайб и их секторов.....	131
3.4.1. Распределение электрического потенциала в круговом секторе...	131
3.4.2. Особенности распределения холловских полей в секторах дисков	134
3.4.3. Измерение величины физического магнетосопротивления.....	135
3.4.4. Экспериментальные данные и их анализ.....	137
3.5. Разработка методик измерения электропроводности анизотропных полупроводниковых пластин и пленок.....	138
3.5.1. Метод определения электропроводности полупроводниковых пленок с помощью квадратного пробника.....	138
3.5.2. Восьмизондовый метод измерений электропроводности анизотропных полупроводниковых пленок.....	141
3.6. Совместные измерения электропроводности и подвижности анизотропных полупроводников.....	149
3.6.1. Восьмизондовый метод совместных измерений электропроводности и коэффициента Холла анизотропных полупроводниковых пленок.....	149
3.6.2. Четырехзондовый метод совместных измерений компонент тензора удельной проводимости и коэффициента Холла.....	155
3.7. Методика определения удельной электропроводности и подвижности носителей заряда в слоистых полупроводниковых материалах.....	160
3.8. Методика определения электропроводности неоднородных по глубине полупроводниковых пленок.....	165
3.8.1. Теоретическое обоснование методики .....	165
3.8.2. Методика определения поверхностной проводимости .....	167
3.8.3. Определенис сопротивления контактов.....	169

<b>Глава 4. Моделирование электронных свойств слоистых и механиче- ски напряженных полупроводниковых наноструктур .....</b>	<b>171</b>
4.1. Особенности физических свойств материалов и приборов на основе кремниевых наноструктур (обзор литературы) .....	171
4.1.1. Механические напряженные полупроводниковые материалы на основе кремний-германиевых гетероструктур.....	171
4.1.2. Квантовохимическое моделирование электронной структуры кремниевых кластеров и наноструктур.....	176
4.2. Механические деформации и зонные диаграммы гетероструктуры кремний-германий.....	181

4.2.1. Расчет деформаций в гетероструктурах с совмещенной кристаллической решеткой.....	181
4.2.2. Моделирование зонной диаграммы наногетероперехода Si-Ge....	184
4.3. Квантовохимическое моделирование электронной структуры кремниевых напряженных наночастиц.....	188
4.4. Моделирование явлений электронного переноса в механически напряженных каналах кремниевых транзисторов.....	197
4.4.1. Моделирование проводниковых свойств каналов кремниевых транзисторов на деформирующей подложке германия.....	197
4.4.2. Особенности резистивных свойств растянутых каналов кремниевых МОП транзисторов.....	199
<b>4.5. Моделирование электронных и кинетических свойств структурных элементов кремниевых нановолокон .....</b>	<b>204</b>
4.5.1. Моделирование электронной структуры малых сфероидальных кремневых кластеров .....	204
4.5.2. Моделирование атомной структуры и электронных свойств кремниевых нанотрубок.....	214
4.6. Квантомеханическое моделирование энергетического спектра носителей заряда в туннельно-резонансных структурах.....	221
4.6.1. Моделирование энергетического спектра носителей заряда в наноструктурах со сложным профилем легирования .....	221
4.6.2. Моделирование энергетического спектра носителей заряда в туннельно-связанных квантовых ямах.....	228
<b>Литература.....</b>	<b>235</b>