

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет радиотехники и электроники

“УТВЕРЖДАЮ”

Декан РЭФ

профессор, д.т.н. Хрусталева
Владимир Александрович

“ ” _____ г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Физические основы электроники

ООП: специальность 210404.65 Многоканальные телекоммуникационные системы

Шифр по учебному плану: ЕН.Ф.9

Факультет: радиотехники и электроники очная форма обучения

Курс: 2, семестр: 3

Лекции: 36

Практические работы: - Лабораторные работы: 16

Курсовой проект: - Курсовая работа: - РГЗ: 3

Самостоятельная работа: 50

Экзамен: 3 Зачет: -

Всего: 102

Новосибирск

2011

Рабочая программа составлена на основании Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению (специальности): 654400 Телекоммуникации.(№ 20 тех/дс от 10.03.2000)

ЕН.Ф.9, дисциплины федерального компонента

Рабочая программа обсуждена на заседании кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств протокол № 5 от 04.07.2011

Программу разработал

доцент, к.т.н.

Дорогой Сергей Викторович

Заведующий кафедрой

профессор, д.т.н.

Вострецов Алексей Геннадьевич

Ответственный за основную образовательную программу

профессор, д.т.н.

Вострецов Алексей Геннадьевич

1. Внешние требования

Таблица 1.1

Шифр дисциплины	Содержание учебной дисциплины	Часы
ЕН.Ф.9	Требования Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению (специальности) 654400 "Телекоммуникации" (210404.65 "Многоканальные телекоммуникационные системы"). ЕН.Ф.09 Физические основы электроники 102 час: элементы зонной теории твердого тела, кристаллическая решетка, типы связей, дефекты решетки; собственный и примесные полупроводники; зонные диаграммы; генерация и рекомбинация носителей заряда; равновесные концентрации носителей заряда, распределение по энергии, влияние поверхностных состояний; эффект внешнего поля; природа контактной разности потенциалов, работа выхода, зонные диаграммы контактов металл - полупроводник и полупроводник - полупроводник (электронно-дырочный переход); диффузионные и дрейфовые токи в полупроводниках и переходах; математическая модель идеализированного электронно-дырочного перехода; физические явления (туннельный эффект, ударная ионизация и др.), вызывающие отклонения от идеализированной модели; инерционные свойства перехода, барьерная и диффузионная емкости; физические процессы в контактах полупроводников с различной шириной запрещенной зоны (гетеропереходы); особенности квантово - размерных структур; фотоэлектрические явления в полупроводниках и переходах, фотопроводимость и фотогальванический эффект; термоэлектрические явления (эффект Пельтье и Зеебека); гальваномагнитный эффект Холла; термоэлектронная эмиссия, вторичная электронная эмиссия и др; понятие о плазме и электрическом разряде в газе; роль физических основ электроники в развитии полупроводниковых приборов, микроэлектроники, электровакуумных и газоразрядных приборов, электронно-лучевых и индикаторных приборов.	102

2. Особенности (принципы) построения дисциплины

Таблица 2.1

Особенности (принципы) построения дисциплины	
Особенность (принцип)	Содержание
Основания для введения	Рабочая программа составлена на основании

дисциплины в учебный план по направлению или специальности	Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению (специальности) 654400 "Телекоммуникации" (210404.65 "Многоканальные телекоммуникационные системы"). Направление подготовки дипломированного специалиста (квалификация - инженер) утверждено приказом Минобразования РФ № 686 от 02.03.2000 г. Регистрационный номер 20 тех/дс от 10. 03. 2000 г
Адресат курса	Студенты дневной формы, обучающиеся по направлению 210404 -" Многоканальные телекоммуникационные системы".
Основная цель (цели) дисциплины	Научить студента выявлять механизмы или движущие силы явлений, положенных в основу работы приборов электроники.
Ядро дисциплины	Составляют физические явления в р-п переходах, на которых базируются приборы современной электроники.
Связи с другими учебными дисциплинами основной образовательной программы	В курсе закрепляются понятия, необходимые для изучения последующих дисциплин, таких, например, как "Электроника" и "Приборы СВЧ и оптического диапазона".
Требования к первоначальному уровню подготовки обучающихся	Студенту для успешного освоения курса необходимо знать основы квантовой механики, физики твердого тела, математического анализа, а для выполнения расчетно-графических работ - знание программы MathCAD-14 или старшей версии. Также необходимо уметь пользоваться графическими программами и Интернетом.
Особенности организации учебного процесса по дисциплине	Студенту для успешного освоения курса необходимо знать основы квантовой механики, физики твердого тела, математического анализа, а для выполнения расчетно-графической работы - знание программы MathCAD-14 или выше версии. Также необходимо уметь пользоваться графическими программами и Интернетом.

3. Цели учебной дисциплины

Таблица 3.1

После изучения дисциплины студент будет

иметь представление	
1	о структуре и элементах симметрии кристаллов
2	об особенностях движения электронов в твердом теле
3	о механизме образования обедненного, обогащенного и инверсного слоев в МДП структурах
4	о физических процессах в полупроводниковых гетеропереходах
5	о физических эффектах в полупроводниках, связанных с переносом заряда и энергии (эффекты Зеебека, Пельтье, Холла)
6	о физических процессах в контактах металл - полупроводник
7	о принципах работы жидкокристаллических устройств отображения информации.
знать	
8	элементы зонной теории и энергетические диаграммы $E(k)$ и $E(x)$
9	математическую модель идеального p-n перехода (теорию Шокли)
10	основные вольт - амперные характеристики, характеризующие работу полупроводниковых приборов
11	условия, необходимые для работы конкретных типов полупроводниковых приборов, использующих p-n переход.
12	термины и основные математические формулы, применяемые в курсе
уметь	
13	читать и изображать на языке формул и зонных диаграмм физические процессы в полупроводниковых структурах
14	рассчитывать основные кристаллографические параметры кристаллических полупроводников
15	анализировать влияние различных факторов (температуры, концентрации легирующей примеси, ширины запрещенной зоны) на параметры полупроводниковых приборов
16	рассчитывать основные равновесные характеристики полупроводников в состоянии термодинамического равновесия: положение уровня Ферми, собственную концентрацию носителей заряда, плотность состояний в зонах, удельную электропроводность.
иметь опыт (владеть)	
17	расчета основных равновесных характеристик p-n перехода (толщину области пространственного заряда, контактную разность потенциалов, ток насыщения, барьерную емкость)

4. Содержание и структура учебной дисциплины

Лекционные занятия

Таблица 4.1

(Модуль), дидактическая единица, тема	Часы	Ссылки на цели
---------------------------------------	------	----------------

Семестр: 3		
Модуль: Элементы кристаллографии		
Дидактическая единица: Элементы симметрии кристаллов		
Кристаллическая решетка. Ячейки Браве. Элементы симметрии. Индексы Миллера. Точечные дефекты кристаллической структуры.	2	1
Модуль: Основы теории полупроводников		
Дидактическая единица: Зонная теория полупроводников		
Элементы зонной теории твердого тела. Эффективная масса электрона. Плотность состояний в разрешенных зонах. Функция распределения Ферми- Дирака. Определение энергии Ферми в полупроводниках. Равновесная концентрация носителей заряда в зонах. Зонные диаграммы твердых тел ($E(k)$) и упрощенные зонные диаграммы ($E(x)$)	4	2
Дидактическая единица: Основные параметры полупроводников		
Классификация полупроводников. Закон действующих масс. Генерация и рекомбинация носителей заряда. Дрейфовая скорость. Подвижность носителей заряда. Удельная электропроводность. Диффузия. Соотношение Эйнштейна. Диффузионные и дрейфовые токи. Температурная зависимость концентрации носителей заряда.	4	12, 13
Дидактическая единица: Контактные явления		
Контактные явления. Контакт Шотки (металл-полупроводник). Работа выхода Выпрямляющий контакт металл- полупроводник n-типа Омический контакт Шотки. Зонные диаграммы контактов металл- полупроводник.	2	6
Дидактическая единица: Основы теории p-n перехода		
P-n переход в состоянии термодинамического равновесия. Основные параметры p-n перехода. Контактная разность потенциалов. Уравнение Пуассона. Ширина ОПЗ. Барьерная и диффузионная емкости. Математическая модель идеального p-n перехода (уравнение Шокли). Физические явления (туннельный эффект, ударная ионизация и др.), вызывающие отклонения от идеализированной модели.	6	10
Модуль: Основы физики полупроводниковых приборов		
Дидактическая единица: Полупроводниковые приборы на основе p-n перехода		
Вольт-амперная характеристика реального диода, ее зависимость от температуры, концентрации и ширины запрещенной зоны. Генерация и	6	10, 11, 12

рекомбинация носителей заряда в p-n переходе Пробой p-n перехода. Туннельный диод. Светоизлучающие инжекционные диоды (СИД). Полупроводниковый лазер.		
Дидактическая единица: Биполярные транзисторы		
Биполярный транзистор (БТ), принцип работы, усиление сигнала, ВАХ БТ в схеме с общей базой, распределение неосновных носителей заряда в базе.	6	10, 11
Дидактическая единица: Полевые транзисторы		
Полевые транзисторы (ПТ). Влияние поверхностных состояний; эффект внешнего поля, образование обогащенного, обедненного и инверсного слоев. МОП конденсатор и его вольт-фарадная характеристика. ПТ с управляющим p-n переходом. ВАХ. МДП транзистор с индуцированным и встроенным каналами. Элементы памяти на МДП структурах.	6	10, 12, 3

Лабораторная работа

Таблица 4.2

(Модуль), дидактическая единица, тема	Учебная деятельность	Часы	Ссылки на цели
Семестр: 3			
Модуль: Основы теории полупроводников			
Дидактическая единица: Основные параметры полупроводников			
Расчет основных физических параметров полупроводников		8	15
Модуль: Основы физики полупроводниковых приборов			
Дидактическая единица: Полупроводниковые приборы на основе p-n перехода			
Расчет параметров идеального p-n перехода на основе конкретного полупроводника (Si, Ge, GaAs, GaP, GaSb, InAs, InSb, InP)	Студент определяет основные характеристики идеального p-n перехода по модели Шокли (концентрацию основных и неосновных носителей заряда, ток насыщения, контактную разность потенциала, ширину и границы ОПЗ, барьерную емкость). Изображает структуру и энергетические диаграммы перехода	8	5, 9

	при внешних смещениях. Сравнивает рассчитанные величины с литературными данными.		
--	--	--	--

5. Самостоятельная работа студентов

Семестр- 3, Контрольные работы

Подготовка к контрольной работе 10 час.

Семестр- 3, РГЗ

Выполнение РГЗ 25 час.

Тема: "Расчет параметров идеального полупроводникового диода, выполненного, например, из Ge"

Целью работы является расчет основных параметров идеального полупроводникового диода в диапазоне температур 200-400К. Определение влияния структуры резкого p-n перехода на его параметры. Работа выполняется с использованием программы MathCAD-14 или выше.

Семестр- 3, Подготовка к занятиям

Подготовка к занятиям 15 час.

6. Правила аттестации студентов по учебной дисциплине

Экзамен (семестр 3). Оценка - по рейтинговой системе.

К зачету в 3 семестре допускаются студенты, выполнившие в срок расчетно-графическую работу (РГР) и защитившие её, а также имеющие положительные оценки за контрольные работы.

К экзамену в 4 семестре допускаются студенты, выполнившие и защитившие лабораторные работы и РГР, а также имеющие положительные оценки за контрольные работы.

Ниже в таблице 6.1 приведена рейтинговая система оценки работы студента по отдельным видам деятельности.

Таблица 6.1

Вид деятельности	Максимальный рейтинг	Достаточный рейтинг для зачета
РГЗ	20	12
Контрольная работа	10	5
Итоговый тест	30	20
Итого:	60	37

Для получения зачета необходимо набрать не менее 62 баллов.

Вводная часть

Для аттестации студентов по дисциплине используется балльно-рейтинговая система. Сумма баллов за текущую деятельность составляет не более 60 баллов, количество баллов по итоговой аттестации (зачет) не превышает 40 баллов.

В течение 3 семестра необходимо выполнить и защитить расчетно-графическое РГЗ, выполнить контрольную работу по материалам лабораторных занятий в сроки, установленные учебным графиком (см. таблицу 6.2).

В течение 4 семестра необходимо выполнить и защитить 4 лабораторные работы., Выполнить и защитить 4 контрольные работы и РГР в сроки, установленные учебным графиком (см. таблицу 6.2).

Правила текущей аттестации

1. К защите лабораторной, контрольной работы и РГЗ допускается студент, выполнивший соответствующее задание в полном объеме и представивший отчет по приведенной на сетевом диске кафедры форме.
2. На защите студент должен ответить на 2-3 теоретических вопроса и 1-2 вопроса по порядку выполнения работы (программные средства, порядок вычислений и т.д.)
3. Максимальное количество баллов, соответствующее оценке «отлично», выставляется, если студент исчерпывающе ответил на все вопросы. Минимальное количество баллов, примерно равное половине от максимального и соответствующее оценке «удовлетворительно», выставляется, если при защите были выявлены серьезные недочеты. Среднее количество баллов выставляется в промежуточном случае (шкалу баллов см. в таблице 6.2).
4. Пересдача лабораторной, контрольной работы или РГЗ назначается в случае, если студент не ориентируется в учебном материале, не может объяснить ход и результаты выполнения работы. Пересдача, как и невыполнение учебного графика, сопровождается потерей 20-30% баллов.

Правила итоговой аттестации

1. К зачету допускаются студенты, защитившие лабораторные работы, контрольную работу и РГЗ и набравшие не менее 30 баллов по результатам текущего рейтинга.
2. Зачет проводится в виде теста из 40 вопросов. Каждый вопрос оценивается в 1 балл.
3. Сумма баллов теста и текущего рейтинга определяют итоговую оценку по дисциплине, как это показано в таблице 6.2.
4. Фрагменты контролирующих материалов приведены в разделе 8.

Таблица 6.2

№	Вид учебной работы	Диапазон баллов	неделя семестра
1	Лабораторная работа 1	4-6	2
2	Лабораторная работа 2	2-4	4
3	Лабораторная работа 3	2-4	6
4	Лабораторная работа 4	2-6	8
5	РГЗ	20-30	17
6	Контрольная работа	5-10	16
	Итого по рейтингу	35-60	
7	Зачет	30-40	
Итого по дисциплине		88-100 (отлично)	
		73-87 (хорошо)	
		50-72 (удовлетворит.)	

Для получения допуска к зачету студент должен набрать не менее 30 баллов по позициям 1...6 таблицы 6.2.

Соответствие проставляемых баллов за итоговую аттестацию оценками представлено в таблице 6.3

Таблица 6.3

Диапазон баллов	Оценка ESTS	Традиционная оценка	
97-100	A+	отлично	зачтено
94-96	A	отлично	зачтено
90-93	A-	отлично	зачтено
87-89	B+	отлично	зачтено
84-86	B	хорошо	зачтено
80-83	B-	хорошо	зачтено
76-79	C+	хорошо	зачтено
73-75	C	хорошо	зачтено
70-72	C-	удовлетворительно	зачтено
67-69	D+	удовлетворительно	зачтено
63-66	D	удовлетворительно	зачтено
60-62	D-	удовлетворительно	зачтено
50-59	E	удовлетворительно	зачтено
25-49	FX	неудовлетворительно	не зачтено

7. Список литературы

7.1 Основная литература

В печатном виде

1. Гуртов В. А. Твердотельная электроника : учебное пособие : [для вузов по специальности 010701 "Физика"] / В. Гуртов. - М., 2005. - 406, [1] с. : ил. - Рекомендовано УМО.
2. Петров К. С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника : учебное пособие для вузов / К. С. Петров. - СПб., 2004. - 521 с. : ил. - Рекомендовано УМО.

7.2 Дополнительная литература

В печатном виде

1. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника / Л. Росадо ; пер. с исп. С. И. Баскакова ; под ред. В. А. Терехова. - М., 1991. - 350, [1] с. : ил.

8. Методическое и программное обеспечение

8.1 Методическое обеспечение

В печатном виде

1. Расчет параметров полупроводников : методические указания по выполнению расчетно-графической работы для студентов 2 курса факультета РЭФ направления 551100 "Проектирование и технология радиоэлектронных средств" и специальностей 201000 "Многоканальные телекоммуникационные системы", 201200 "Средства связи с подвижными объектами" / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост. С. В. Дорогой]. - Новосибирск, 2003. - 19 с. : ил.

В электронном виде

1. Расчет параметров полупроводников : методические указания по выполнению расчетно-графической работы для студентов 2 курса факультета РЭФ направления 551100 "Проектирование и технология радиоэлектронных средств" и специальностей 201000 "Многоканальные телекоммуникационные системы", 201200 "Средства связи с подвижными объектами" / Новосиб. гос. техн. ун-т ; [сост. С. В. Дорогой]. - Новосибирск, 2003. - 19 с. : ил. - Режим доступа: <http://www.library.nstu.ru/fulltext/metodics/2003/2578.rar>

8.2 Программное обеспечение

1. Microsoft, Office XP, Офисный пакет приложений
2. Microsoft, Windows , ОС для применения на серверах
3. Parametric Technology Corporation, MathCAD 14, Система автоматизации математических расчетов

9. Контролирующие материалы для аттестации студентов по дисциплине

Экзаменационные вопросы 2011 г.

1. Генерация и рекомбинация носителей заряда в собственных и примесных полупроводниках.
2. Закон действующих масс. Механизмы образования основных и неосновных носители заряда.
3. Функция распределения Ферми-Дирака. Энергия (уровень) Ферми, расположение на зонной диаграмме $E(x)$.
4. Температурная зависимость концентрации основных носителей заряда в собственном и примесном полупроводниках.
5. Рассеяние носителей заряда. Подвижность носителей заряда, зависимость от физических параметров.
6. Диффузия, 1-й закон Фика. Коэффициент диффузии, температурная зависимость. Соотношение Эйнштейна.
7. Рекомбинационные процессы в полупроводниках (излучательные и безызлучательные).
8. Удельная электропроводимость полупроводников, температурная зависимость для собственных и примесных полупроводников.
9. Диффузионная и дрейфовая плотности токов.
10. Термоэлектрические эффекты Зеебека, Пельтье.
11. Контакт металл-полупроводник (омический), зонная диаграмма $E(x)$.
12. Контакт металл-полупроводник (неомический), зонная диаграмма $E(x)$.
13. Р-п переход в состоянии термодинамического равновесия, зонная диаграмма $E(x)$, основные параметры.
14. Распределение объемной плотности заряда, концентрации основных и неосновных носителей заряда в несимметричном идеальном р+n переходе в состоянии термодинамического равновесия.
15. Р-п переход при прямом смещении, зонная диаграмма $E(x)$, основные характеристики.
16. Р-п переход при обратном смещении, зонная диаграмма $E(x)$, основные характеристики.
17. Контактная разность потенциалов в р-п переходе. Механизм образования.
18. Область пространственного заряда (ОПЗ) в идеальном р-п переходе. Структура, границы, причина образования ОПЗ.
19. Интегральная барьерная емкость р-п перехода. Причина образования.
20. Уравнения Пуассона. Определение напряженности электрического поля в р-п переходе в состоянии термодинамического равновесия.
21. Вольтамперная характеристика идеального р-п перехода (уравнение Шокли). Влияние на ВАХ физических параметров.
22. Ток насыщения идеального р-п перехода, физический смысл. Зависимость от параметров.
23. ВАХ туннельного диода, связь с зонной диаграммой $E(x)$.
24. Светоизлучающие диоды. Структура, принцип работы.
25. Солнечный элемент. Структура, принцип работы.
26. Принцип работы полупроводникового лазера. Инверсная населенность.
27. Причины отличия ВАХ идеального и реального р-п переходов.
28. Структура, принцип работы биполярного транзистора. Схемы включения.
29. Усиление сигнала биполярным транзистором в схеме с общей базой.
30. Усиление сигнала биполярным транзистором в схеме с общим эмиттером. Коэффициент усиления.
31. Статические ВАХ биполярного транзистора в схеме с общей базой.

32. Физические процессы в базе биполярного транзистора. Распределение концентрации неосновных носителей заряда в активном режиме (схема с общей базой).
33. Полевой транзистор с управляющим р-п переходом. Структура, принцип действия.
34. Процесс перекрытия канала в полевом транзисторе с управляющим р-п переходом.
35. Статические ВАХ полевого транзистора с управляющим р-п переходом. Коэффициент усиления (крутизна).
36. Эффект поля. МОП конденсатор. Режимы обеднения, обогащения, инверсии.
37. Полевой транзистор с индуцированным каналом. Структура, принцип действия.
38. Элементы памяти на полевых транзисторах с "плавающим затвором". Структура элементов, процессы зарядки и разрядки "плавающего затвора".

Примеры тестовых вопросов 2011 г.

1. Как изменится удельное электрическое сопротивление собственного полупроводника с ростом температуры?
 - 1.1. увеличится
 - 1.2. уменьшится
 - 1.3. не изменится
2. От чего зависит удельная электропроводимость примесных полупроводников при постоянной (300 К) температуре?
 - 2.1. от концентрации примеси
 - 2.2. от полярности приложенного напряжения
 - 2.3. от ширины запрещенной зоны
 - 2.4. от валентности примеси
3. Какой полупроводник имеет большее удельное электрическое сопротивление?
 - 3.1. примесный n-типа
 - 3.2. примесный p-типа
 - 3.3. компенсированный
 - 3.4. собственный
4. Чем в основном определяется собственная концентрация носителей заряда при $T = \text{const}$?
 - 4.1. шириной запрещенной зоны
 - 4.2. типом проводимости
 - 4.3. положением уровня Ферми
 - 4.4. эффективной массой
5. В каком полупроводнике собственная концентрация носителей заряда выше, если $E_g(\text{Ge}) = 0,66 \text{ эВ}$, $E_g(\text{Si}) = 1,12 \text{ эВ}$, $E_g(\text{GaAs}) = 1,44 \text{ эВ}$?
 - 5.1. Ge
 - 5.2. Si
 - 5.3. GaAs
6. Какую часть электрического тока переносят дырки в собственном полупроводнике, если подвижность электронов в 3 раза больше, чем дырок?
 - 6.1. $2/3$
 - 6.2. $1/3$
 - 6.3. $1/4$
 - 6.4. $3/4$
7. Напряжение какой полярности возникает при облучении р-п перехода светом?
 - 7.1. плюс на р-области, если энергия кванта больше E_g
 - 7.2. плюс на n-области
 - 7.3. полярность напряжения определяется длиной волны падающего света
 - 7.4. плюс на р-области, если энергия кванта меньше E_g
 - 7.5. минус на n-области

8. Расположить в порядке возрастания значения работ выхода в собственном (Φ_i), электронном (Φ_n) и дырочном полупроводниках (Φ_p).
 - 8.1. $\Phi_n > \Phi_p > \Phi_i$
 - 8.2. $\Phi_i > \Phi_p > \Phi_n$
 - 8.3. $\Phi_p > \Phi_i > \Phi_n$
 - 8.4. $\Phi_p > \Phi_n > \Phi_i$
9. Какое соотношение между токами выполняется в биполярном транзисторе в активном режиме в схеме с общей базой? $I_{\text{э}} = I_{\text{к}} < I_{\text{б}}$
 - 9.1. $I_{\text{э}} > I_{\text{к}} \gg I_{\text{б}}$
 - 9.2. $I_{\text{э}} > I_{\text{б}} \gg I_{\text{к}}$
 - 9.3. $I_{\text{б}} > I_{\text{э}} > I_{\text{к}}$
 - 9.4. $I_{\text{к}} > I_{\text{э}} \gg$
10. Как изменяется напряжение туннельного пробоя с ростом температуры?
 - 10.1. увеличивается
 - 10.1. уменьшается
 - 10.2. не изменяется
11. В каком несимметричном переходе p+n или n+p, будет больше обратный ток при одинаковых концентрациях в соответствующих базовых и эмиттерных областях?
 - 11.1. p+n
 - 11.2. n+p
 - 11.3. токи одинаковы

Расчет параметров полупроводников
Методические указания

по выполнению расчетно-графической работы для студентов II курса факультета РЭФ
направления 210200 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» и
специальностей: 210404 «Многоканальные телекоммуникационные системы», 210402
«Средства связи с подвижными объектами», 210405 «Радиосвязь, радиовещание и
телевидение»

Составитель: канд. техн. наук, доц. С.В. Дорогой

Рецензент: доц. Н.И. Коржавин,

В работе даны варианты расчетно-графических заданий по дисциплинам «Физические основы микроэлектроники» и «Физические основы электроники». Рассмотрены примеры получения аппроксимационных зависимостей основных физических параметров полупроводников, таких как подвижности электронов и дырок при произвольных значениях температуры и концентрации примеси на основании экспериментальных результатов и известного вида зависимостей. Результаты расчетов, выполненных в среде MathCAD, сравниваются с литературными данными.

Методические указания основаны на наиболее достоверных фактических данных, имеющихся в научной литературе и Интернет источниках.

Работа подготовлена на кафедре КТПС

© Новосибирский государственный
технический университет, 2003

Введение

Знание основных физических параметров полупроводников и их зависимостей от различных факторов, например, температуры, необходимо для расчета конкретных характеристик полупроводниковых приборов. Из огромного числа полупроводниковых материалов выбраны 8 полупроводников, имеющих максимальное распространение, соответствующих вариантам РГЗ, а именно: кремний (Si), германий (Ge), арсенид галлия (GaAs), фосфид галлия (GaP), антимонид галлия (GaSb), антимонид индия (InSb), арсенид индия (InAs), фосфид индия (InP). Расчет параметров производится для примесных невырожденных полупроводников как для n-, так и для p типов проводимости. Соответствующие концентрации доноров и акцепторов приведены в задании. При решении практических задач часто бывает необходимо получить математическое выражение для произвольно изменяющейся функции по экспериментальным точкам. В общем виде сделать это непросто. Задача существенно упрощается, если известен вид аппроксимирующей функции. В работе предлагается сделать обработку экспериментальных зависимостей ($\mu_n(T)$, $\mu_p(T)$, $\mu_n(N_d)$, $\mu_p(N_a)$,)) по известному виду функций и получить соответствующие аппроксимационные зависимости как функции одной переменной. Эти зависимости могут быть использованы как для расчета других параметров полупроводников, например, электропроводности, так и характеристик элементов полупроводниковых приборов, например, p-n перехода. Также получаемые зависимости допускают проведение над ними обычных математических операций, например, интегрирование или дифференцирование. Работа выполняется с использованием программы MathCAD-2000 или других.

1. Основные физические параметры полупроводников

К основным физическим параметрам полупроводников, подлежащих определению, относятся:

1. m_{dn}^* , m_{dp}^* - эффективные массы плотности состояний электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне.
2. $N_C(T)$ эффективная плотность состояний в зоне проводимости.
3. $N_V(T)$ эффективная плотность состояний в валентной зоне.
4. $n_i(T)$ собственная концентрация носителей заряда.
5. $E_g(T)$ ширина запрещенной зоны полупроводника.
6. $\mu_n(T, N_d=\text{const})$, $\mu_n(T=300 \text{ K}, N_d)$, $\mu_p(T, N_a=\text{const})$, $\mu_p(T=300 \text{ K}, N_a)$ подвижности электронов и дырок. Концентрации примесей N_d , N_a - указаны в варианте. Если не удастся найти экспериментальные зависимости при заданных значениях концентрации примеси или температуры, то использовать наиболее близкие данные.
7. $\rho_i(T)$ - удельное электрическое сопротивление собственного полупроводника.
8. Положение уровня Ферми в примесном полупроводнике относительно разрешенных зон ($E_C - E_F$ или $E_F - E_V$) в заданном диапазоне температур. Использовать допущение полной ионизации примесей, полупроводник невырожденный.

9. Положение уровня Ферми в примесном полупроводнике относительно разрешенных зон ($E_C - E_F$, $E_F - E_V$) при фиксированной температуре ($T=300K$) для заданных значений N_d и N_a .
10. Изменение положения уровня Ферми в собственном полупроводнике при увеличении температуры относительно середины запрещенной зоны (E_i).
11. Температуру начала собственной проводимости ($n_i(T) > N_d$ или $p_i(T) > N_a$).
12. Отношение подвижности электронов к подвижности дырок при фиксированном значении температуры ($T=300 K$) в зависимости от концентрации примеси. Задать концентрации N_d и N_a в широком диапазоне, например $10^{14} \text{ см}^{-3} \dots 10^{19} \text{ см}^{-3}$.
13. Зависимость удельного электрического сопротивления примесного полупроводника (n - и p-типа) от концентрации примеси (N_d и N_a , соответственно) при постоянной температуре ($T_0=300K$). Задать концентрации N_d и N_a как в п.12.
14. $D_n(T)$, $D_p(T)$ коэффициенты диффузии электронов и дырок в зависимости от температуры

2. Основные формулы и соотношения

Эффективная плотность состояний в зоне проводимости	$N_C(T) = 2 \left(\frac{2\pi k T m_{dn}^*}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$	(1)
Эффективная плотность состояний в валентной зоне	$N_V(T) = 2 \left(\frac{2\pi k T m_{dp}^*}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$	(2)
Температурная зависимость ширины запрещенной зоны	$E_g(T) = E_{g0} - \frac{A \cdot T^2}{T + B}$	(3)
Собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике	$n_i(T) = \left[N_C(T) N_V(T) \exp\left(-\frac{E_g(T)}{kT}\right) \right]^{\frac{1}{2}}$	(4)
Температурная зависимость энергии Ферми	$E_F(T) = \frac{1}{2}(E_C + E_V) - \frac{1}{2}kT \ln\left(\frac{p}{n}\right) - \frac{3}{4}kT \ln\left(\frac{m_{dn}^*}{m_{dp}^*}\right)$	(5)
Температурная зависимость энергии Ферми для собственного полупроводника	$E_{F_i}(T) = E_i - \frac{3}{4}kT \ln\left(\frac{m_{dn}^*}{m_{dp}^*}\right), \text{ где } E_i - \text{середина запрещенной зоны}$	(5 a)

Концентрационная зависимость подвижности электронов и дырок	$\mu_i(N) = \mu_{i\min} + \frac{\mu_{i\max} - \mu_{i\min}}{1 + \left(\frac{N}{N_{ig}}\right)^{\gamma_i}}, \quad i=n, p$	(6)
Температурная зависимость подвижности электронов и дырок	$\mu_i(T) = Const \cdot T^{-\delta}, \quad \delta = 1.5 \div 2.5 \quad i=n, p$	(7)
Удельное электрическое сопротивление собственного полупроводника	$\rho_i(T) = \frac{1}{qn_i(T) \cdot (\mu_n(T) + \mu_p(T))}$	(8)
Концентрация свободных электронов в зоне проводимости	$n(T) = N_C(T) \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right)$	(9)
Концентрация свободных дырок в валентной зоне	$p(T) = N_V(T) \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right)$	(10)
Закон действующих масс	$n(T) \cdot p(T) = (n_i(T))^2$	(11a)
	$n_n(T) \cdot p_n(T) = (n_i(T))^2 \text{ для n-типа}$	(11б)
	$p_p(T) \cdot n_p(T) = (n_i(T))^2 \text{ для p-типа}$	(11в)
Соотношение Эйнштейна	$\frac{D_n(T)}{\mu_n(T)} = \frac{D_p(T)}{\mu_p(T)} = \frac{kT}{q} = U_T(T)$	(12)

Аппроксимацией (приближением) функции $f(x)$ называется нахождение такой функции $g(x)$ (**аппроксимирующей функции**), которая была бы близка заданной. Критерии близости функций $f(x)$ и $g(x)$ могут быть различные.

В том случае, когда приближение строится на дискретном наборе экспериментальных точек, аппроксимацию называют **точечной** или **дискретной**.

Экспериментальные данные берутся из литературных источников, например из [8-11] или из текущей научной периодики.

3. Порядок выполнения работы

1. Скопировать в единый раздел необходимые для расчета физические константы, такие как постоянные Больцмана, Планка, заряд электрона и т.д. из Ресурсного Центра программы MathCAD (Resource Center→QuickSheets and Reference Tables→Basic Science Reference→Fundamental Physical Constants). Обратить внимание на наличие размерностей.
2. Выписать значения констант, относящихся к конкретному полупроводнику из таблицы 1, с учетом размерностей, например, ширину запрещенной зоны при $T=0K$ (E_{g0}). Задать диапазон изменения величин, например, температуры и концентрации доноров (N_d) и акцепторов (N_a).

Пример 1 Задание диапазонов изменяемых величин с различным шагом. Температура (T) имеет шаг 1 К, а концентрация доноров (N_d) – $4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

$$T_0 := 300 \cdot K \quad T_{\text{min}} := 200 \cdot K, 201 \cdot K \dots 400 \cdot K$$

$$N_d := 1 \cdot 10^{14} \cdot \text{cm}^{-3}, 5 \cdot 10^{14} \cdot \text{cm}^{-3} \dots 1 \cdot 10^{18} \cdot \text{cm}^{-3}$$

Напоминаем, что «нижний индекс» переменной N_d , в MathCAD ставится через точку, а

не с помощью кнопки  панели Матрицы, это элемент матрицы.

Записать выражение для температурной зависимости ширины запрещенной зоны, согласно уравнению (3). Сделать правую часть выражения сначала безразмерной, поделив T на Кельвин, и присвоить затем размерность электрон-вольт. Так как в MathCAD нет встроенной единицы измерения «электрон-вольт», то необходимо самим ее определить и присвоить. Результат для Si выглядит так:

Пример 2 Температурная зависимость ширины запрещенной зоны кремния $E_g(T)$, размерность – электрон-вольт.

$$q := 1.60217653 \cdot 10^{-19} \cdot \text{coul}$$

$$\text{eV} := V \cdot q \quad E_{g0} := 1.17 \cdot \text{eV} \quad A := 0.000473 \cdot \frac{\text{eV}}{K} \quad B := 636 \cdot K$$

$$E_g(T) := E_{g0} - \frac{A \cdot T^2}{T + B} \quad E_g(300 \cdot K) = 1.125 \cdot \text{eV}$$

3. Определить эффективную массу плотности состояний электронов в зоне проводимости и эффективную массу плотности состояний дырок в валентной зоне. Это можно сделать с помощью формул (1) и (2), если подставить численные значения для N_c или N_v при $T=300 \text{ K}$ из таблицы 1 и решить уравнения относительно m_{dn}^* и m_{dp}^* .

Напоминаем, что эти величины используются исключительно для расчета $N_c(T)$, $N_v(T)$. Результат представить в виде: $m_{dn}^* = \text{Const} \cdot m_0$, где m_0 -масса электрона и поместить перед формулами для $N_c(T)$, $N_v(T)$.

4. Определить собственную концентрацию носителей заряда, построить график $n_i(T)$ и вычислить температуру начала собственной проводимости.

Таблица 1

Базовые физические параметры полупроводников (T=300K) <http://www.ioffe.spb.ru/>

Вариант	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
Полупроводник	Si	Ge	GaAs	GaP	GaSb	InSb	InAs	InP
n-тип, Nd, см ⁻³	5*10 ¹⁷	8*10 ¹⁷	2*10 ¹⁷	8*10 ¹⁶	5*10 ¹⁶	9*10 ¹⁵	2*10 ¹⁶	5*10 ¹⁶
p-тип, Na, см ⁻³	2*10 ¹⁶	5*10 ¹⁶	5*10 ¹⁶	5*10 ¹⁵	5*10 ¹⁷	2*10 ¹⁷	5*10 ¹⁷	5*10 ¹⁷
Eg, эВ	1.12	0.661	1.424	2.26	0.726	0.17	0.354	1.344
Eg0, эВ	1.17	0.742	1.519	2.34	0.813	0.24	0.415	1.421
A, эВ/К	0.000473	0.00048	0.0005405	0.00062	0.000378	0.0006	0.000276	0.00049
B, К	636	235	204	460	94	500	83	327
Nc, см ⁻³	3.2*10 ¹⁹	1.0*10 ¹⁹	4.7*10 ¹⁷	1.8*10 ¹⁹	2.1*10 ¹⁷	4.2*10 ¹⁶	8.7*10 ¹⁶	5.7*10 ¹⁷
Nv, см ⁻³	1.8*10 ¹⁹	5.0*10 ¹⁸	9.0*10 ¹⁸	1.9*10 ¹⁹	1.8*10 ¹⁹	7.3*10 ¹⁸	6.6*10 ¹⁸	1.1*10 ¹⁹
n _i , см ⁻³	1*10 ¹⁰	2.0*10 ¹³	2.1*10 ⁶	2	1.5*10 ¹²	2*10 ¹⁶	1*10 ¹⁵	1.3*10 ⁷
ε	11.7	16.2	12.9	11.1	15.7	16.8	15.15	12.5
ρ _i , Ом·см	3.2*10 ⁵	46	3.3*10 ⁸	8*10 ¹⁵	10 ³	4*10 ⁻³	0.16	8.6*10 ⁷
μ _n , см ² /(В*с)	≤1400	≤3900	≤8500	≤250	≤3000	≤7.7*10 ⁴	≤4*10 ⁴	≤5400
μ _p , см ² /(В*с)	≤450	≤1900	≤400	≤150	≤1000	≤850	≤5*10 ²	≤200

5. Используя экспериментальные результаты из работ [8-11], получить аппроксимационные выражения для подвижностей электронов и дырок в зависимости от температуры при заданном значении концентрации примеси и отдельно от концентрации примеси в диапазоне $10^{14} \dots 10^{19} \text{ см}^{-3}$ при $T = \text{const}$. При $T = 300 \text{ К}$ практически во всех исследованных полупроводниках температурную зависимость можно описать уравнением (6). В некоторых случаях вместо функции Find можно использовать Minerr. Построить совместно экспериментальные и аппроксимационные зависимости $\mu_n(T)$, $\mu_p(T)$, $\mu_n(N_d)$, $\mu_p(N_a)$.

Пример 3 Получение температурной зависимости подвижности дырок в Si из уравнения (7) с помощью блока Given - Find. Размерность подвижности задана в $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Знак равенства в уравнениях должен быть логический, а число уравнений в блоке Given – Find соответствовать числу неизвестных. Экспериментальные зависимости приведены в приложении 2. (рис.4, кривая 3). Подробности

$TT := (10^{1.918} \quad 10^{2.126} \quad 10^{2.513} \quad 10^{2.639}) \cdot K$	($\text{íàòðè òù ýêñïìáððèíáíðàëüíüð$ $\text{òí÷àë, ñïðòàòòòàáíí äëý$ $\text{òàííàðòòòü è íâàèæíñòè}$)
$MM := (10^{3.802} \quad 10^{3.44} \quad 10^{2.637} \quad 10^{2.33}) \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{sec}}$	
Const := 1 $\delta_m := 1$	($\text{íà÷àëüíüà ó ñèíàëý}$)
Given	
$10^{3.802} = \text{Const} \cdot (10^{1.918})^\delta \quad 10^{2.33} = \text{Const} \cdot (10^{2.639})^\delta$	($\text{áëíè ðàðáí èý ñèñòáíü$ $\text{óðàáíáíèè (Given-Find)}$)
$\left(\begin{matrix} \text{Const} \\ \delta_m \end{matrix} \right) := \text{Find}(\text{Const}, \delta)$	($\text{÷èñëáííüà çíà÷ áíèý$ $\text{íàèçâñòíü ò áàèè÷è}$)
$\mu_p(T) := \text{Const} \cdot \left(\frac{T}{K} \right)^\delta \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{sec}}$	(èñèííâ àíð àèñèàòèí íâ óðàáíáíèà)

Результат аппроксимации в сравнении с экспериментом показан на рис.1

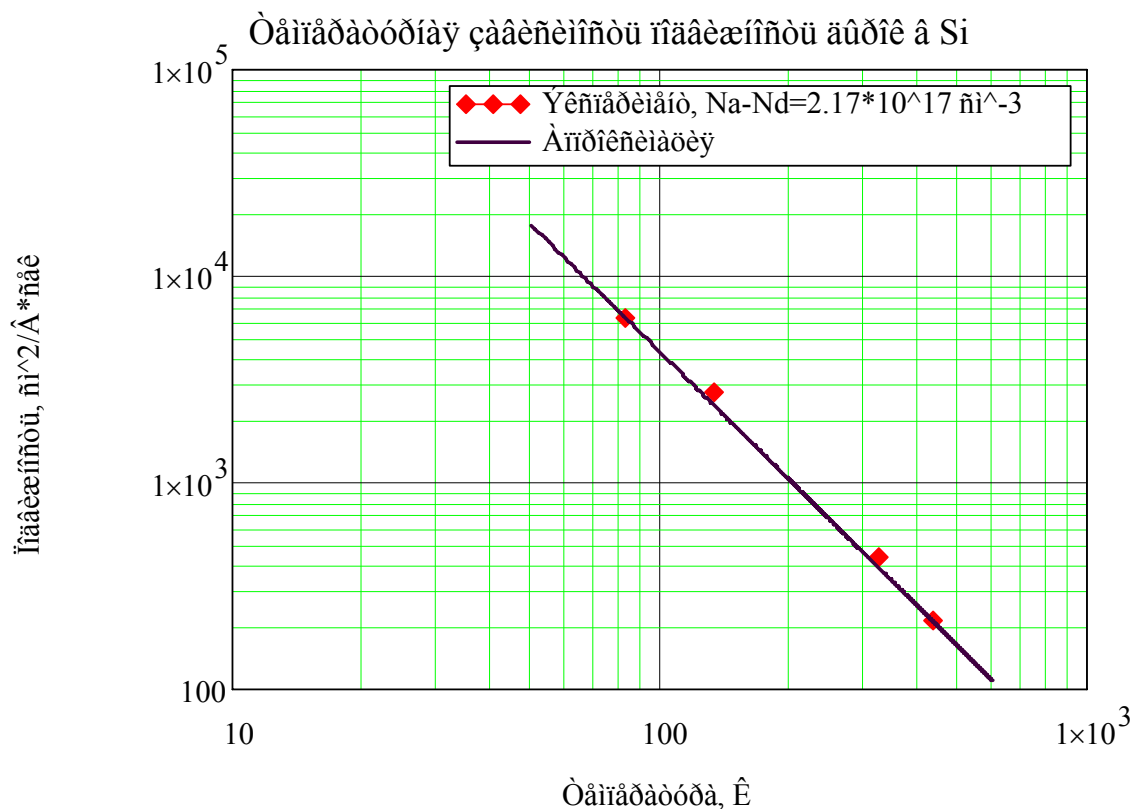


Рис. 1 Температурные зависимости подвижностей дырок в кремнии р-типа электропроводности. Концентрация примесей - $N_a=2.4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $N_d=2.3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Пример 4 Получение концентрационной зависимости подвижности дырок в кремнии с помощью блока (Given – Find) и подбора начальных условий при постоянной температуре $T_0=300\text{K}$. При использовании блока (Given – Minerr) число уравнений может быть больше числа неизвестных.

$$\begin{aligned} \text{MMM} &:= \left(10^{2.698} \quad 10^{2.698} \quad 10^{2.588} \quad 10^{2.367} \quad 10^{1.99} \right) \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{sec}} && (\text{ìàððèòù} \\ &&& \text{ïäâèæíñòàé} \\ &&& \text{è êîíòàíððàðèé}) \\ \text{NNN} &:= \left(10^{15} \quad 10^{16} \quad 10^{17} \quad 10^{18} \quad 10^{19} \right) \cdot \text{cm}^{-3} \\ \mu_{\max} &:= 550 \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{sec}} && \mu_{\min} := 10 \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{sec}} && (\text{ãðàíè÷íà çà÷àíèŷ} \\ &&& && \text{ïäâèæíñòàé}) \\ N_{\text{ref}} &:= 100 \cdot \text{cm}^{-3} && \xi := 1 && (\text{íà÷àèüíà çà÷àíèŷ} \\ &&& && \text{íàèçâåñòîíò àâèè÷è}) \\ N_a &:= 10^{15} \cdot \text{cm}^{-3}, 5 \cdot 10^{15} \cdot \text{cm}^{-3} \dots 10^{19} \cdot \text{cm}^{-3} && (\text{àèàíàçíí èçíàíèŷ} \\ &&& && \text{êîíòàíððàðèé} \\ &&& && \text{àèðàíððà}) \end{aligned}$$

Given

$$10^{2.698} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{sec}} = \mu_{\min} + \frac{\mu_{\max} - \mu_{\min}}{1 + \left(\frac{10^{16} \cdot \text{cm}^{-3}}{N_{\text{ref}}} \right)^{\xi}}$$

$$10^{2.367} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{sec}} = \mu_{\min} + \frac{\mu_{\max} - \mu_{\min}}{1 + \left(\frac{10^{18} \cdot \text{cm}^{-3}}{N_{\text{ref}}} \right)^{\xi}}$$

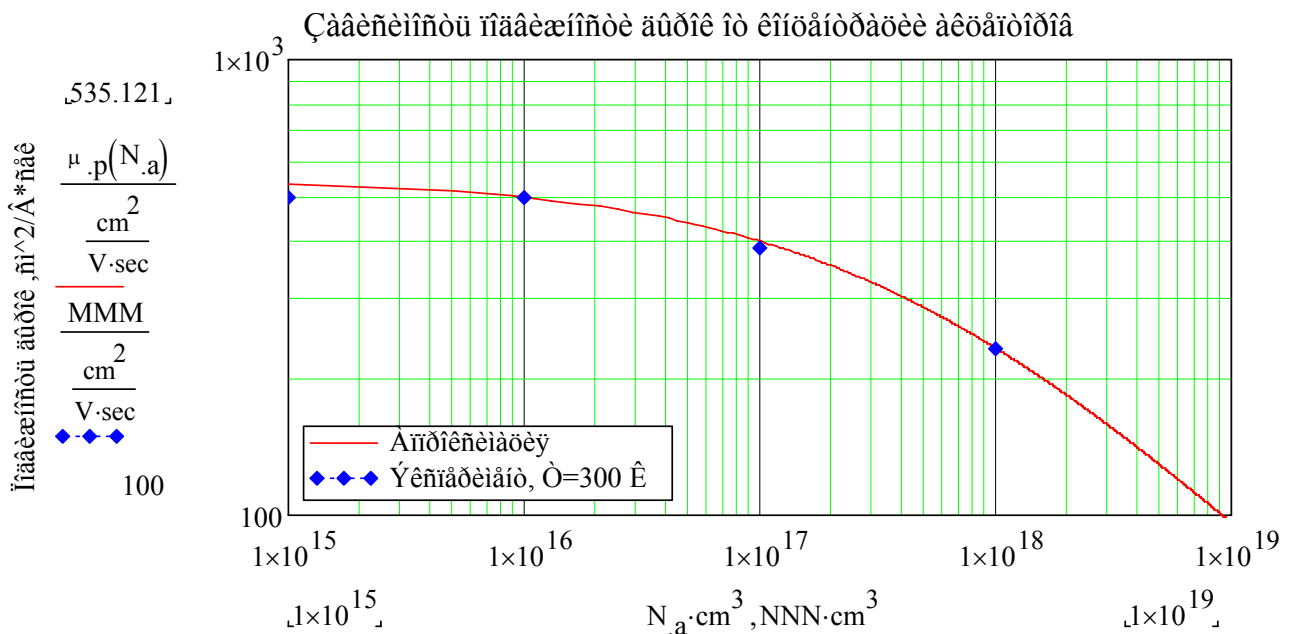
$$\left(\begin{matrix} N_{\text{ref}} \\ \xi \end{matrix} \right) := \text{Find}(N_{\text{ref}}, \xi) \quad \xi = 0.567 \quad N_{\text{ref}} = 5.364 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$\mu_p(N_a) := \mu_{\min} + \frac{\mu_{\max} - \mu_{\min}}{1 + \left(\frac{N_a}{N_{\text{ref}}} \right)^{\xi}}$$

(áëîê ðååîëÿ
ñèñòàì òðàáîíèé
Given-Find)

(èñîñîâ
àïðîêñèìàöèÿ
âóððàæàíåà äëÿ
ïðàâåëèííîå àâðîíè)

Результаты аппроксимации и экспериментальная зависимость подвижности дырок в кремнии от концентрации акцепторов показаны на рис.2.



Èíîáîððàöèÿ àåðîðîððà, ñè⁻³

Рис. 2 Зависимость подвижности дырок в Si от концентрации акцепторов (N_a)

6. Рассчитать удельное электрическое сопротивление собственного полупроводника по формуле (8). Сравнить полученный результат при $T=300$ К с литературными данными. Наиболее достоверные данные приведены в работе [11], часть из которых дана в таблице 1.

7. Определить положение уровня Ферми в примесном и собственном полупроводниках в зависимости от температуры относительно границ разрешенных зон N_C , N_V . Использовать допущение полной ионизации примесей, т.е. $n \approx N_d$, а $p \approx N_a$ при расчете по формулам (9) и (10).
8. Оценить температуру начала собственной проводимости в примесном полупроводнике, т.е. определить с помощью уравнений (9) или (10) температуру, при которой ($n_i(T) > N_d$ или $p_i(T) > N_a$)).
9. Построить график отношения подвижности электронов к подвижности дырок при фиксированном значении температуры ($T=300$ K) в зависимости от концентрации примеси. Задать концентрации N_d и N_a в широком диапазоне, например от 10^{14} см^{-3} до 10^{19} см^{-3} .
10. Рассчитать и построить на одном графике зависимости удельного электрического сопротивления примесного полупроводника (n - и p-типа) от концентрации примеси (N_d и N_a , соответственно) при постоянной температуре ($T=300\text{K}$). Задать концентрации N_d и N_a как в п. 9.
11. Определить коэффициенты диффузии электронов и дырок в зависимости от температуры при заданных концентрациях примесей. Построить графики $D_n(T)$ и $D_p(T)$.

4. Требования к работе

1. Использовать общепринятые размерности физических величин в тексте и на графиках, например μ [$\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$] или [$\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$]. Не допускается использование произвольных размерностей, которые автоматически присваивает программа MathCAD, например подвижности, $\text{с}^2 \cdot \text{А} \cdot \text{кг}^{-1}$, вместо общепринятой $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.
2. Графики должны иметь общепринятый масштаб (линейный или логарифмический), например значения на осях 0, 50, 100, 150, а не 43.5, 60.5, 77.5 и т.д., название, обозначение трасс и размерностей величин.
3. На аппроксимационные, экспериментальные зависимости и формулы должны быть литературные ссылки (номер из списка литературы в косых скобках). Аппроксимационные зависимости можно получить также с помощью встроенных функций сглаживания:
 - $\text{expfit } Y=a \cdot \exp(bx)+c$
 - $\text{logfit } Y=a \cdot \ln(x+b)+c$
 - $\text{pwrfit } Y=a \cdot x^b+c$ и т.д. (из Ресурсного центра программы MathCAD (Resource Center → Overview and Tutorials → Analyzing Your Data → Specialized Fitting Function))
4. Список литературы с использованием библиографических правил обязателен.
5. Все рассчитанные величины должны сравниваться с литературными или Internet - источниками. Допускается расхождение до 10 %.

5. Контрольные вопросы

1. Как изменяется удельное электрическое сопротивление собственного полупроводника с ростом температуры?
2. При каких условиях удельное электрическое сопротивление полупроводника достигает максимума при $T=300\text{ K}$?
3. Физический смысл ширины запрещенной зоны и как ее можно экспериментально определить?
4. От чего зависит удельная электропроводимость примесных полупроводников при постоянной температуре ($T=300\text{ K}$)?
5. Чем определяется собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике? В каком полупроводнике собственная концентрация носителей заряда выше, если $E_g(\text{Ge})=0,66\text{ эВ}$, $E_g(\text{Si})=1,12\text{ эВ}$, $E_g(\text{GaAs})=1,44\text{ эВ}$?
6. К чему на зонной диаграмме $E(x)$ стремится уровень Ферми в полупроводнике n -типа с ростом температуры?
7. Определить условие, при котором уровень Ферми в собственном полупроводнике не зависит от температуры.
8. Как изменится положение уровня Ферми относительно границ разрешенных зон в примесном полупроводнике при увеличении концентрации примеси?
9. Каким образом образуются в примесном полупроводнике носители заряда? Объяснить с использованием зонной диаграммы $E(x)$.
10. Как зависит концентрация носителей заряда в примесном полупроводнике от температуры?
11. Что такое подвижность носителей заряда, от каких физических параметров она зависит, в какие формулы входит?
12. Как зависит коэффициент диффузии носителей заряда от температуры?
13. Какую часть электрического тока переносят дырки в собственном Si, если подвижность электронов равна $1350\text{ см}^2\text{ В}^{-1}\text{ с}^{-1}$, а дырок – $450\text{ см}^2\text{ В}^{-1}\text{ с}^{-1}$?
14. Как изменится удельное электрическое сопротивление полупроводника с концентрацией доноров Nd, если в него добавить равное количество акцепторной примеси Na?
15. Что такое основные и неосновные носители? Как они обозначаются в полупроводнике n -типа?
16. Чем отличается распределение Ферми - Дирака от распределения Максвелла Больцмана?
17. Что такое собственная концентрация носителей заряда?

18. Запишите формулы для диффузионных составляющих токов.
19. Как связаны диффузионная длина и время жизни неосновных носителей?

Литература

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. В 2 кн.; Пер. с англ. -2-е перераб. изд. -М.: Мир, 1984.
2. Маллер Р., Кейминс,Т. Элементы интегральных схем. -М.:Мир,1989.
3. Пасынков В,В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы. -М.: Высшая школа, 1987.
4. Росадо Л. Физическая электроника и микроэлектроника. -М.: Высшая школа, 1991.
5. Шур М. Физика полупроводниковых приборов. В 2 кн.; Пер. с англ - М.: Мир, 1992.
6. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С. Г. Физика полупроводников. -М.: Наука, 1990.-688 с.: илл.
7. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. -М.: Радио и связь,1990.-264 с.: илл.
8. Таблицы физических величин. //Под ред. И.К. Кикоина, М: Атомиздат, 1976.
9. Физические величины. Справочник/ А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейликова. –М.: Энергоатомиздат, 1991. –1232 с.
- 10.Баранский П.И., Клочков В.П., Потыкевич И.В. Полупроводниковая электроника. Свойства материалов/ Справочник; -Киев: Наукова думка, 1975, 704 с.
- 11.Петров К.С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника: Учебное пособие – СПб.: Питер, 2004. – 522 с.: ил.

Интернет- источники

12. <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/> или <http://www.ioffe.spb.ru/> Физико-технический институт им. Иоффе г. Санкт-Петербург (большая база данных по свойствам полупроводников (на английском языке), полнотекстовые электронные версии ведущих отечественных журналов в формате PDF (на русском языке:

- Физика и техника полупроводников;
- Журнал технической физики;
- Физика твердого тела;
- Письма в журнал технической физики.

Имеется поиск по содержанию всех журналов.

Фрагмент базы данных по полупроводникам находится на сервере в терминальном классе (4-526) по адресу S:\doro\ioffe...\semicond\index.htm. К сожалению в оригинальной базе данных имеются ошибки.

13. <http://www.prometeus.nsc.ru/> Отделение ГПНТБ СО РАН (Академгородок).

Отличный электронный каталог, простой дружественный интерфейс с примерами запросов. Поиск в каталогах и базах данных ГПНТБ СО РАН. Включены издания с 1991 года.

Приложение 1

Основные используемые обозначения

Символ	Физическая величина	Единица измерения
m_{dn}^*	эффективная масса плотности состояний электронов в зоне проводимости	кг
m_{dp}^*	эффективная масса плотности состояний дырок в валентной зоне	кг
ρ_i	удельное электрическое сопротивление собственного полупроводника	Ом·см
A	коэффициент температурной зависимости ширины запрещенной зоны в уравнении (3)	эВ/К
B	коэффициент температурной зависимости ширины запрещенной зоны в уравнении (3)	К
D_n	коэффициент диффузии электронов	см ² ·с ⁻¹
D_p	коэффициент диффузии дырок	см ² ·с ⁻¹
E_F	энергия Ферми	эВ
E_g	ширина запрещенной зоны	эВ
E_{g0}	ширина запрещенной зоны при 0 К	эВ
h	постоянная Планка	Дж·с
k	постоянная Больцмана	Дж/К
n	концентрация свободных электронов	м ⁻³
N_a	концентрация акцепторов (фиксированная величина)	м ⁻³
N_a	концентрация акцепторов (переменная величина)	м ⁻³
N_c	эффективная плотность состояний в зоне проводимости	м ⁻³
N_d	концентрация доноров (фиксированная величина)	м ⁻³
N_d	концентрация доноров (переменная величина)	м ⁻³
n_i	собственная концентрация носителей заряда в полупроводнике	м ⁻³
n_n	концентрация свободных электронов (основных носителей заряда)	м ⁻³

Символ	Физическая величина	Единица измерения
	в n-области	
n_p	концентрация свободных электронов (неосновных носителей заряда) в p-области	м^{-3}
N_v	эффективная плотность состояний в валентной зоне	м^{-3}
p	концентрация свободных дырок	м^{-3}
p_n	концентрация свободных дырок (неосновных носителей заряда) в n- области	м^{-3}
p_p	концентрация свободных дырок (основных носителей заряда) в p- области	м^{-3}
q	элементарный заряд электрона	Кл
T	температура	К
μ_n	подвижность электронов	$\text{м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
μ_p	подвижность дырок	$\text{м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$

Экспериментальные зависимости.

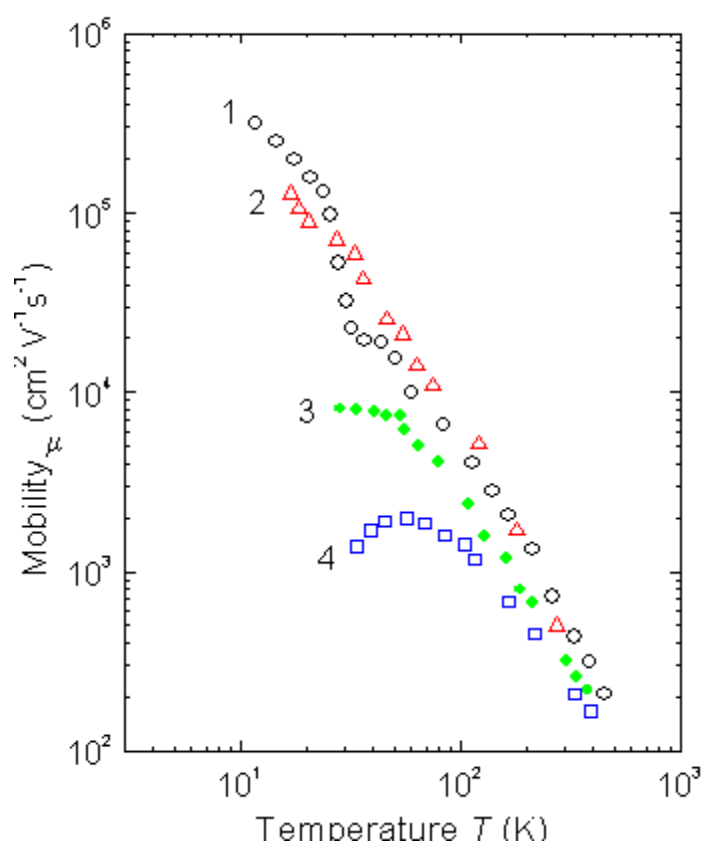


Рис.4 Температурные зависимости подвижности дырок в кремнии для разных концентраций примесей [11]

1 - $N_a = 2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$;

2 - $N_a = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$;

3 - $N_a = 2.4 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_d = 2.3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$;

4 - $N_a = 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_d = 4.9 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

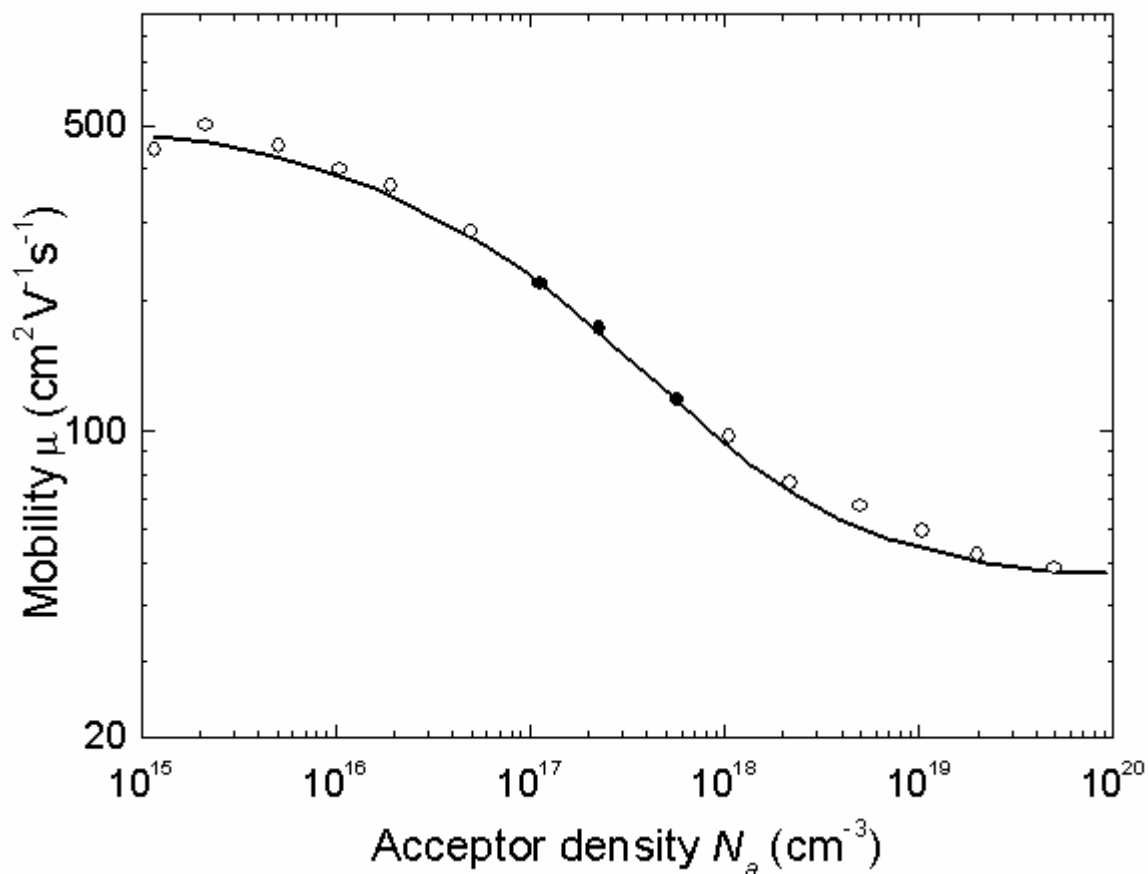


Рис. 5 Зависимость подвижности дырок в кремнии от концентрации акцепторов при $T=300 \text{ K}$ [11]

Приложение 3

Пример считывания координат с графиков, выполненных в логарифмическом масштабе.

Порядок выполнения операций

1. Копируем исходный график температурной зависимости подвижности электронов в кремнии (www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/Si/Figs/131.gif) (рис. 6) в стандартную программу Paint.
2. Переходим к равномерным чисто логарифмическим шкалам (линии и цифры темно-красного цвета), т.е. вдоль оси температур будем откладывать $\lg T$ (ось X), а вдоль оси подвижностей – $\lg \mu_n$ (ось Y) (рис 7)

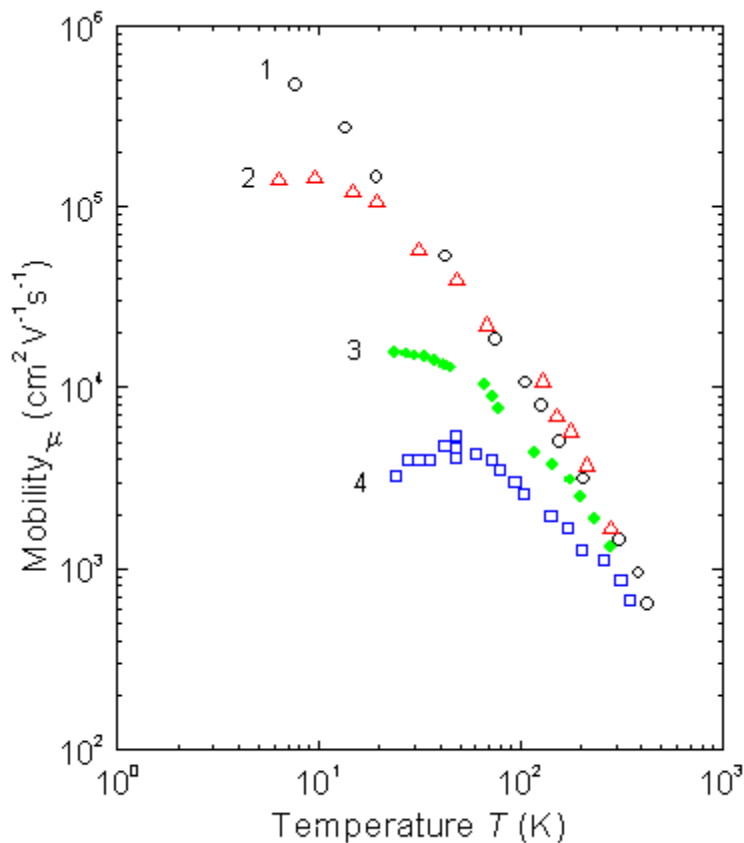


Рис. 6 Исходный график температурной зависимости подвижности электронов в кремнии при различных концентрациях примесей: 1 - высокочистый Si ($N_d < 10^{12} \text{ см}^{-3}$), 2 - высокочистый Si ($N_d < 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$), 3 - $N_d = 1.75 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $N_a = 1.48 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, 4- $N_d = 1.3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $N_a = 2.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

3. С помощью инструмента «Прямоугольник» в программе Paint определяем координаты точки относительно начала координат. Если не отпускать левую клавишу мыши, то координаты по X и Y можно считать в правом нижнем окне, (первое число по оси X, второе – по оси Y). На рис. 7 красным цветом показаны численные значения координат точки в пикселях (пкс).
4. Составляем пропорции и определяем координаты точки в логарифмическом формате и, далее, численное значение физической величины;

Ось X (1-0) ÷ 112 пкс, т.е. 1 соответствуют 112 пкс, а определяемой точке x_1 соответствуют 197 пкс. Таким образом десятичный логарифм искомой величины x_1 равен:

$$\lg(x_1) = \frac{1 \cdot 197}{112} = 1.759, \text{ а соответствующая } x_1 \text{ температура } T_1 \text{ будет равна}$$

$$T_1 = 10^{1.759} = 57.412 \text{ K}$$

Ось Y (1-0) ÷ 102 пкс, т.е. 1 соответствуют 102 пкс, а определяемой точке y_1 соответствуют 164 пкс. Таким образом десятичный логарифм искомой величины y_1 равен:

$$\lg(y_1) = \frac{1 \cdot 164}{102} = 1.608. \text{ а соответствующая } y_1 \text{ подвижность } \mu_1 \text{ будет равна}$$

$$\mu_1 = 10^{1.608+2} = 4.055 \cdot 10^3 \frac{\tilde{n}^2}{\tilde{A} \cdot \tilde{n} \tilde{e}}, \text{ т.к. отсчет по оси Y начинается с 2.}$$

Для построения экспериментальной зависимости в MathCAD-е достаточно 8-10 точек, которые заносятся в матрицу с указанием размерности.

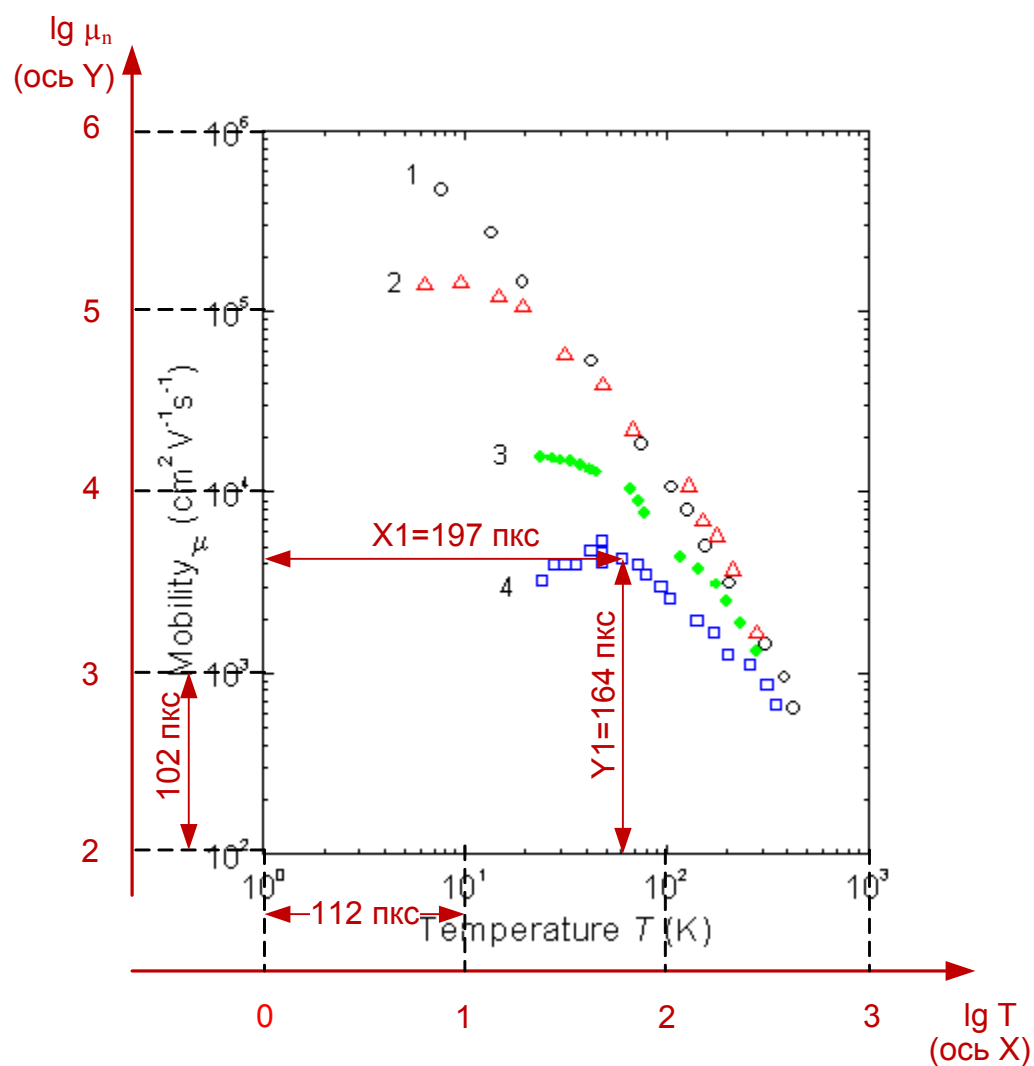


Рис. 7 Исходный график $\mu_n(T)$ с равномерными логарифмическими осями