

УДК 536-002.532
ББК 22.37+22.365
Д53

Серия основана в 2006 г.

Дмитриев А. С.

Д53 Введение в нанотеплофизику / А. С. Дмитриев. — 3-е изд., электрон. — М. : Лаборатория знаний, 2024. — 793 с. — (Нанотехнологии). — Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10". — Загл. с титул. экрана. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-93208-685-8

Эта книга — одна из первых в мировой литературе монографий, посвященных тепловым процессам в наномасштабных системах. Проанализированы классические и современные представления о теплофизике нанообъектов. Рассмотрены механизмы переноса тепла в различных наноструктурах, методы вычисления теплопроводности, в том числе в нанопроволоках и нанотрубках, нанокомпозитах и наножидкостях. Проведен анализ радиационного теплопереноса на наномасштабах. Особое внимание уделено роли межфазных границ и влиянию размерных (классических и квантовых) эффектов, приводящих к особенностям и аномалиям теплопереноса. Отражено современное состояние интенсивно развивающихся областей теплофизики — нанотермогидродинамики и нанотермоэлектричества.

Для студентов, аспирантов и специалистов в области физики твердого тела, нанонауки и нанотехнологий, физики и техники низких температур, энергетики и теплофизики.

УДК 536-002.532
ББК 22.37+22.365

Деривативное издание на основе печатного аналога: Введение в нанотеплофизику / А. С. Дмитриев. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. — 790 с. : ил. — (Нанотехнологии). — ISBN 978-5-9963-0843-9.

В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации

ISBN 978-5-93208-685-8

© Лаборатория знаний, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	9
Глава 1. Классическая теплофизика	15
1.1. Объекты и методы классической теплофизики. Носители энергии и их основные свойства	15
1.2. Классическая термодинамика и статистика	17
1.2.1. Законы термодинамики	17
1.2.2. Статистические функции распределения	17
1.2.3. Вычисление термодинамических функций	20
1.3. Перенос тепла в классической теплофизике	30
1.3.1. Средняя длина свободного пробега в межмолекулярных взаимодействиях в газах и теплопроводность	30
1.3.2. Перенос тепла в твердых диэлектриках. Фононная теплопроводность	32
1.3.3. Перенос тепла в металлах	35
1.3.4. Явления переноса: уравнение Больцмана	35
1.3.5. Уравнение Больцмана и макроскопические переменные	37
1.3.6. Теплопроводность: уравнение Фурье, уравнение Каттанео и их обобщение	38
1.4. Уравнения гидродинамики вязкой жидкости	42
1.5. Уравнения конвективного переноса тепла	43
1.6. Размерные эффекты в классической термогидродинамике	46
1.6.1. Теплопроводность в газе с учетом размерных эффектов	46
1.6.2. Поток тепла в баллистическом режиме	47
1.6.3. Переходы между режимами	49
1.7. Радиационный перенос тепла	51
1.7.1. Феноменологическое описание радиационного переноса тепла	52
1.7.2. Рассеяние в диффузионной среде	54
1.7.3. Электромагнитное происхождение теплового излучения	57
1.8. Основные ограничения классической теплофизики и новые подходы	57
Глава 2. Наномир и объекты нанотеплофизики	59
2.1. Мир наномасштаба	59
2.2. Объекты нанотеплофизики: наноструктуры и процессы в них	60
2.2.1. Объекты нанотеплофизики	60
2.3. Особенности теплофизики наномира	67
2.3.1. Масштабные факторы в теплофизике	71
2.3.2. Классические и квантовые размерные эффекты	71
2.3.3. Роль объема и поверхности в процессах переноса тепла	76

2.4. Экспериментальные методы изготовления наноструктур	76
2.5. Методы экспериментального исследования термодинамических и кинетических явлений в наноструктурах.	81
2.5.1. Сканирующая тепловая микроскопия.	81
2.5.2. 3ω -техника	85
2.5.3. Техника термического коэффициента отражения	88
2.5.4. 2ω -метод измерения тепловых свойств на наномасштабах.	88
Глава 3. Термодинамика наноструктур	90
3.1. Носители энергии в конденсированных телах и газах	90
3.2. Термодинамика наноструктур	90
3.2.1. Понятие температуры	91
3.2.2. Примеры важности определения температуры.	93
3.2.3. Понятие термодинамического среднего.	93
3.3. Внутренняя энергия и удельная теплоемкость наноструктур	94
3.3.1. Теплоемкость наночастиц	94
3.3.2. Теплоемкость нанопроволок	99
3.4. Теплоемкость нанотрубок.	106
3.5. Удельная теплоемкость 2D-графена и 3D-графита	108
3.6. Удельная теплоемкость одностенных пучков нанотрубок и многостенных нанотрубок	111
3.7. Неуглеродные нанотрубки	113
Глава 4. Кинетика переноса тепла в наноструктурах.	115
4.1. Особенности кинетики переноса тепла в наноструктурах.	115
4.1.1. Механизмы переноса тепла — наномасштабные факторы	116
4.1.2. Некоторые характерные масштабы и режимы переноса тепла	119
4.1.3. Пределы теплопереноса в наноструктурированных материалах.	125
4.1.4. Явления наномасштабного переноса тепла.	131
4.2. Общие методы кинетики переноса тепла в различных приближениях	135
4.3. Формализм Ландауэра.	138
4.4. Уравнение Больцмана	142
4.4.1. Введение	142
4.4.2. Приближение времени релаксации	145
4.4.3. «Серое» приближение для фононного уравнения Больцмана	147
4.4.4. «Полусерое» приближение для фононного уравнения Больцмана	150
4.4.5. Полностью дисперсионное приближение для фононного уравнения Больцмана	151
4.4.6. Баллистически-диффузионное уравнение	153
4.4.7. Методы Монте-Карло для уравнения Больцмана	161
4.4.8. Уравнение Больцмана на решетке	162
4.5. Методы молекулярной динамики	163
4.5.1. Основные положения метода молекулярной динамики	163
4.5.2. Формула Грина—Кубо	169
4.5.3. Метод атомных функций Грина в кинетике переноса тепла	172
4.6. Фононная гидродинамика	174
Глава 5. Механизмы переноса тепла.	
Теплопроводность и теплопроводимость.	179
5.1. Теплопроводность в наноструктурах	179
5.1.1. Фононы и их энергетический спектр	180
5.1.2. Общие соотношения для теплопроводности	181

5.1.3. Уравнение Больцмана для фононов	181
5.2. Теплопроводность 1D- и квази-1D-наноструктур	183
5.2.1. Общие положения	183
5.2.2. Теплопроводность квазиодномерных наноструктур.	185
5.2.3. Модели теплопереноса в нанопроволоках и других квази- 1D-структурах	187
5.2.4. Теплоперенос в нанопроволоках с учетом сложности границы	213
5.3. Теплоперенос в нанотрубках	231
5.3.1. Получение и свойства нанотрубок	231
5.3.2. Баллистический перенос тепла в одностенных углеродных нанотрубках	234
5.3.3. Квазibalлистический теплоперенос в ОСУНТ	237
5.3.4. Диффузионный перенос в одностенных углеродных нанотрубках	241
5.3.5. Теплоперенос в многостенных углеродных нанотрубках	242
5.3.6. Нарушение закона Фурье в нанотрубках	246
5.4. Квантовый перенос тепла.	250
5.5. Теплопроводность 2D-наноструктур	261
5.5.1. Общие свойства графена.	262
5.5.2. Теплопроводность графена	264
5.5.3. Простая модель теплопроводности графена	268
5.5.4. Теплопроводность нанослоев и пленок	270
5.5.5. Теплопроводность наногетероструктур	284
5.6. Пределы теплопроводности	290
5.6.1. Нижний предел теплопроводности	291
5.6.2. Верхний предел теплопроводности	292

Глава 6. Граничное термосопротивление в наноструктурах. 294

6.1. Общие представления	295
6.1.1. Термическая контактная проводимость и термическое сопротивление.	295
6.1.2. Диффузионное термическое стягивание (термическая контракция).	297
6.1.3. Баллистическое термическое сопротивление	299
6.1.4. Общее термическое сопротивление	300
6.1.5. Экспериментальное определение термического контактного сопротивления.	300
6.2. Вычисление граничного термосопротивления	301
6.2.1. Модель акустического импеданса (<i>АММ</i>)	301
6.2.2. Модель диффузионного импеданса (<i>ДММ</i>)	305
6.3. Термосопротивление в наноструктурах.	309
6.3.1. Общие свойства термических интерфейсных наноматериалов	310
6.3.2. Модель теплопереноса через малую область контакта между телами	319
6.3.3. Дифракционный предел в термической проводимости.	321
6.3.4. Модель цилиндрического контакта с плоской подложкой.	325
6.3.5. Контактное термосопротивление в различных режимах	329
6.3.6. Контактное термосопротивление в баллистическом режиме (разные материалы).	331
6.3.7. Контактное термическое сопротивление для реальных поверхностей	333

6.3.8. Одиночные связи	335
6.3.9. Теплоперенос в мезоскопических структурах нанопроволока/нанотрубка—подложка	338
6.4. Термосопротивление в наноструктурах. Мультисвязи	342
6.4.1. Термическое контактное сопротивление в структурах нанотрубок	342
6.4.2. Фононный теплоперенос через пересекающиеся нанотрубки (термосопротивление в узлах).	343
6.4.3. Фононный теплоперенос через компактные пеллеты пересекающихся нанотрубок	346
6.4.4. Слабые и сильные связи в тепловых изоляционных материалах	349
6.4.5. Термическое контактное сопротивление между структурами нанотрубок и другими нанообъектами	353
6.5. Контактное термосопротивление в нановолокнах	355
6.6. Термическое сопротивление в мезоструктурах. Вклад многократного отражения фононов	358
6.6.1. Наноконтакт между двумя тепловыми резервуарами	360
6.6.2. Наноконтакт между наноструктурой и полупространством	361
6.6.3. Определение термического контактного сопротивления.	362
6.6.4. Эффективная неравновесная температура наноструктуры.	362
6.6.5. Соотношение для контактного сопротивления	364
6.6.6. Многократное отражение фононов в наноструктурах	364
6.6.7. Частично баллистический режим в термическом резервуаре	365
6.7. Термическое контактное сопротивление на сетке случайных наноконтактов	367
6.7.1. Термическое контактное сопротивление в случайно распределенных контактных точках	367
6.7.2. Теплопроводность с изменением масштабов	368
6.7.3. Контактная модель Арчарда.	369
6.8. Контактное термическое сопротивление в других наноинтерфейсах	370
6.8.1. Нанокompозитный интерфейс нанопроволоки Ag с полимером	370
6.8.2. Наноинтерфейс на основе случайно расположенных нанотрубок	373

Глава 7. Термогидродинамика на мезо- и наномасштабах 377

7.1. Роль размерных эффектов в гидродинамике.	379
7.2. Число Кнудсена, кнудсеновский слой и особенности течений.	381
7.2.1. Медленное обтекание микросферы	386
7.2.2. Экспериментальные результаты по обтеканию сферической частицы.	387
7.2.3. Аналитическое решение на основе уравнения Навье—Стокса.	387
7.2.4. Аналитическое решение из 13-моментного приближения Грэда	388
7.2.5. Аналитическое решение на основе кинетической теории	388
7.3. Кнудсеновский слой с учетом теплопереноса	389
7.4. Гидродинамика и граничные условия.	392
7.4.1. Исторический экскурс в проблему прилипания и скольжения жидкости на поверхности твердого тела.	393
7.4.2. Базисная гидродинамическая теория	396
7.4.3. Модель длины скольжения	398
7.4.4. Экспериментальные методы	400
7.4.5. Факторы, влияющие на длину скольжения.	409
7.4.6. Механизм скольжения	410
7.5. Термогидродинамика со скольжением	410

7.5.1. Течение между параллельными стенками	411
7.5.2. Течение Пуазейля со скольжением	413
7.5.3. Теплообмен с условием скольжения Навье	416
7.5.4. Тепловые граничные условия	421
7.6. Термогидродинамика на наноструктурированной поверхности	423
7.6.1. Варианты определения длины скольжения	423
7.6.2. Структурные масштабы	426
7.6.3. Особенности скольжения на наноструктурированных поверхностях.	427
7.7. Термогидродинамика внутри наноструктур	439
7.8. Некоторые специфические проблемы термогидродинамики наноструктур	447
7.8.1. Образование нанопены при испарении жидкости из наноструктур	447
7.8.2. Пористые мембраны на основе управляемой структуры нанотрубок	450
Глава 8. Теплоперенос в нанокompозитах и наножидкостях	453
8.1. Теплоперенос в нанокompозитах.	453
8.1.1. Общие представления	453
8.1.2. Теплопроводность композитов: эффективная среда	454
8.1.3. Кинетический подход к переносу в нанокompозитах	462
8.1.4. Модифицированные модели эффективной среды.	465
8.1.5. Нанокompозиты: описание вне рамок эффективной среды	468
8.1.6. Теплоперенос в нанокompозитах с нерегулярной структурой	479
8.1.7. Теплоперенос в напряженных нанокompозитах	481
8.1.8. Теплоперенос в нанокompозитах, содержащих нанотрубки и нановолокна.	486
8.2. Теплоперенос в наножидкостях	495
8.2.1. Основные свойства наножидкостей	495
8.2.2. Теплопроводность наножидкостей.	497
8.2.3. Модели для описания теплопроводности наножидкостей	502
8.2.4. Конвективный теплообмен в наножидкостях	513
8.2.5. Теплообмен при кипении наножидкостей	517
Глава 9. Нанотермогидродинамика поверхности	528
9.1. Особенности наноструктурированных поверхностей	528
9.1.1. Особенности природных мезо- и наноструктурированных поверхностей	530
9.1.2. Искусственные супергидрофобные поверхности	535
9.2. Теоретические модели смачивания	538
9.2.1. Модель Юнга	539
9.2.2. Модели для шероховатых поверхностей: Венцеля и Касси—Бакстера.	540
9.3. Современные модели смачивания супершероховатых поверхностей	547
9.3.1. Обобщенная теория контактных углов на супершероховатых поверхностях.	547
9.3.2. Вычисление контактных углов	552
9.4. Процессы на наносероховатых и супергидрофобных поверхностях	557
9.4.1. Супергидрофобные поверхности с нанотрубками.	558
9.4.2. Супергидрофобные поверхности с наноструктурами	559

9.5. Управление процессами смачиваемости на нанощероховатых и супергидрофобных поверхностях	561
9.5.1. Электросмачивание.	563
9.5.2. Тепловое управление режимами смачиваемости.	569
9.5.3. Управление электромагнитным излучением	571
9.6. Физика кипения на наноструктурированных поверхностях	577
9.6.1. Кипение в структуре нанопроволок	580
9.6.2. Наноструктурированные микропористые поверхности	586
9.6.3. Наноструктурированные функциональные поверхности	593
Глава 10. Тепловое излучение в наноструктурах	600
10.1. Наномасштабный радиационный теплоперенос	600
10.2. Флуктуации электромагнитного поля и тепловой поток	607
10.3. Когерентный и некогерентный радиационный перенос тепла	612
10.4. Тепловое излучение наноструктур в дальней зоне	614
10.5. Тепловое излучение наноструктур в ближней зоне	615
10.5.1. Тепловое излучение наночастиц.	615
10.5.2. Тепловое излучение между двумя наночастицами	617
10.5.3. Тепловое излучение в ближнем поле с плоской поверхности.	619
10.5.4. Тепловое излучение через малый вакуумный зазор	623
10.5.5. Тепловое излучение на малых масштабах: некоторые эксперименты	627
10.6. Резонансное туннелирование и увеличение теплового потока	628
10.6.1. Механизм фотонного туннелирования.	632
10.6.2. Индуцирование поверхностными поляритонами пространственной когерентности.	633
10.6.3. Микроскопические и макроскопические уравнения Максвелла	636
10.7. Некоторые задачи наномасштабного радиационного теплообмена	637
10.7.1. Локальный нагрев поверхности и реакция острия сканирующего туннельного микроскопа	637
10.7.2. Теплообмен между двумя наночастицами	639
10.8. Экспериментальные исследования радиационного теплообмена.	642
10.8.1. Радиационный теплообмен между двумя стеклянными (диэлектрическими) параллельными пластинами	642
10.8.2. Радиационный теплообмен между сферой и подложкой	645
10.8.3. Радиационный теплообмен между двумя параллельными металлическими пластинами	648
10.9. Термофотовольтоника в ближнем поле	649
Глава 11. Нанотермоэлектричество	653
11.1. Введение в термоэлектричество	653
11.1.1. Основные понятия	653
11.1.2. Термоэлектрические свойства стандартных материалов	655
11.1.3. Эффективность термоэлектрического преобразования	657
11.1.4. Теоретические основы термоэлектрического преобразования	658
11.1.5. Термоионные системы и преобразователи.	662
11.2. Термоэлектричество наноразмерных систем	667
11.2.1. Термоэлектрический перенос в низкоразмерных системах	668
11.2.2. Термоэлектрические наноматериалы.	678
11.2.3. Термоэлектрические материалы — стратегия на будущее	714
11.3. Термоэлектрические модули и их применение.	730
Список литературы	738