

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	13
Предисловие редактора перевода	16
Список сокращений	18
Список основных обозначений	25
Физические константы	30

1 Введение	31
1.1. Историческая справка	31
1.2. Лауреаты Нобелевских премий за открытия и изобретения в области физики полупроводников	39
1.3. Общая информация	40

I. Основы

2 Связи	47
2.1. Введение	47
2.2. Ковалентные связи	47
2.2.1. Электрон-электронная связь (47). 2.2.2. sp^3 -связь (47). 2.2.3. sp^2 -связь (51).	
2.3. Ионная связь	53
2.4. Смешанная связь	54
2.5. Металлическая связь	57
2.6. Ван-дер-Ваальсова связь	57
2.7. Оператор Гамильтона твердого тела	58

3 Кристаллы	60
3.1. Введение	60
3.2. Кристаллическая структура	60
3.3. Решетка	61
3.3.1. Элементарная ячейка (61). 3.3.2. Точечные группы (62). 3.3.3. Пространственные группы (64). 3.3.4. Двумерные решетки Бравэ (65). 3.3.5. Трехмерные решетки Бравэ (66). 3.3.6. Поликристаллические полупроводники (69). 3.3.7. Аморфные полупроводники (69).	
3.4. Важнейшие кристаллические структуры	71
3.4.1. Структура каменной соли (71). 3.4.2. Структура CsCl (71). 3.4.3. Структура алмаза (71). 3.4.4. Структура цинковой обманки (72). 3.4.5. Структура вюртцита (73). 3.4.6. Структура халькоперита (73). 3.4.7. Структура флюорита (76). 3.4.8. Структура делафосситов (77). 3.4.9. Структура перовскита (77). 3.4.10. Структура NiAs (78). 3.4.11. Прочие структуры (78).	

3.5. Политипизм	79
3.6. Обратная решетка	80
3.6.1. Векторы обратной решетки (81). 3.6.2. Индексы Миллера (82). 3.6.3. Зоны Бриллюэна (84).	
3.7. Сплавы	85
3.7.1. Неупорядоченные сплавы (85). 3.7.2. Фазовая диаграмма (87). 3.7.3. Приближение эффективного кристалла (88). 3.7.4. Постоянная решетки (88). 3.7.5. Самоупорядочивание (89).	
4 Дефекты	92
4.1. Введение	92
4.2. Точечные дефекты	92
4.2.1. Типы точечных дефектов (92). 4.2.2. Термодинамика (94). 4.2.3. Диффузия (96). 4.2.4. Распределение легирующих примесей (98).	
4.3. Дислокации	105
4.3.2. Визуализация дислокаций травлением (108). 4.3.3. Закрепление дислокаций (110).	
4.4. Макродефекты	111
4.4.1. Микротрещины (111). 4.4.2. Дефекты упаковки (111). 4.4.3. Границы зерен (113). 4.4.4. Противофазные и инверсионные домены (116).	
4.5. Разупорядочивание	117
5 Механические свойства	118
5.1. Введение	118
5.2. Колебания решетки	118
5.2.1. Моноатомная линейная цепочка (118). 5.2.2. Двухатомная линейная цепочка (121). 5.2.3. Колебания решетки в трехмерном кристалле (123). 5.2.4. Плотность состояний (126). 5.2.5. Фононы (127). 5.2.6. Локализованные колебательные моды (127). 5.2.7. Фононы в сплавах (130). 5.2.8. Генерация электрического поля оптическими фононами (132).	
5.3. Упругость	134
5.3.1. Термическое расширение (134). 5.3.2. Напряжения и деформации (134). 5.3.3. Биаксиальные деформации (138). 5.3.4. Трехмерные деформации (139). 5.3.5. Изгиб подложки (141). 5.3.6. Скручивание (142). 5.3.7. Критическая толщина (144).	
5.4. Раскалывание	147
6 Зонная структура	148
6.1. Введение	148
6.2. Электроны в периодическом потенциале	148
6.2.1. Теорема Блоха (148). 6.2.2. Приближение свободных электронов (149). 6.2.3. Модель Кронига–Пенни (150). 6.2.5. Вырождение Крамерса (155).	
6.3. Зонная структура типичных полупроводников	155
6.3.1. Кремний (155). 6.3.2. Германий (155). 6.3.3. GaAs (156). 6.3.4. GaP (156). 6.3.5. GaN (156). 6.3.6. Соли свинца (157). 6.3.7. Халькопириты (157). 6.3.8. Делафосситы (158). 6.3.9. Перовскиты (159).	
6.4. Сплавные полупроводники	160
6.5. Аморфные полупроводники	162
6.6. Систематика запрещенных зон в полупроводниках	162
6.7. Температурная зависимость запрещенной зоны	164
6.8. Дисперсия электронов	166

6.8.1. Уравнение движения электронов (166).	6.8.2. Эффективная масса электрона (167).	6.8.3. Полярная масса (170).	6.8.4. Непараболичность электронной массы (172).
6.9. Дисперсионные зависимости дырок	172		
6.9.1. Концепция дырок (172).	6.9.2. Соотношение дисперсии для дырок (173).	6.9.3. Тонкая структура валентной зоны (177).	
6.10. Влияние напряжений на зонную структуру	179		
6.10.1. Влияние напряжений на положение краев зон (179).	6.10.2. Влияние напряжений на эффективные массы (181).	6.10.3. Взаимодействие с локальным состоянием (181).	
6.11. Плотность состояний	182		
6.11.1. Обобщенная структура зон (182).	6.11.2. Свободный электронный газ (184).		
7 Электронные состояния дефектов	186		
7.1. Введение	186		
7.2. Распределение Ферми–Дирака	186		
7.3. Концентрация носителей	187		
7.4. Собственная проводимость	191		
7.5. Мелкие примеси, легирование	193		
7.5.1. Доноры (193).	7.5.2. Акцепторы (202).	7.5.3. Компенсация (205).	7.5.4. Сочетание нескольких примесей (208).
7.5.5. Амфотерные примеси (208).	7.5.6. Сильное легирование (210).		
7.6. Квазиуровни Ферми	213		
7.7. Глубокие уровни	214		
7.7.1. Заряд состояний (215).	7.7.2. Двойные доноры (217).	7.7.3. Двойные акцепторы (217).	7.7.4. Эффект Яна–Теллера (218).
7.7.5. U -отрицательные центры (219).	7.7.6. DX-центры (221).	7.7.7. EL-2 дефекты (222).	7.7.8. Полуизолирующие полупроводники (223).
7.7.9. Изoeлектронные примеси (224).	7.7.10. Поверхностные состояния (226).		
7.8. Водород в полупроводниках	227		
8 Процессы переноса	230		
8.1. Введение	230		
8.2. Проводимость	230		
8.3. Перенос заряда в слабом электрическом поле	233		
8.3.1. Подвижность (233).	8.3.2. Объемные процессы рассеяния (234).	8.3.3. Рассеяние на ионизированных примесях (234).	8.3.4. Рассеяние на деформационном потенциале (234).
8.3.5. Рассеяние на пьезоэлектрическом потенциале (235).	8.3.6. Рассеяние на полярных оптических фононах (235).	8.3.7. Рассеяние на дислокациях (235).	8.3.8. Рассеяние на границах зерен (236).
8.3.9. Температурная зависимость (236).	8.3.10. Зависимость от легирования (238).	8.3.11. Пьезосопротивление (239).	
8.4. Эффект Холла	240		
8.5. Перенос заряда в сильных электрических полях	244		
8.5.1. Насыщение дрейфовой скорости (244).	8.5.2. Отрицательное дифференциальное сопротивление (245).	8.5.3. Превышение скорости насыщения (overshoot) (247).	8.5.4. Ударная ионизация (247).
8.6. Высокочастотная проводимость	249		
8.7. Диффузия	249		
8.8. Уравнение непрерывности	251		

8.9. Теплопроводность	251
8.10. Связь переноса заряда и тепла	253
8.10.1. Эффект Зеебека (253). 8.10.2. Эффект Пельтье (254).	
9 Оптические свойства	256
9.1. Основные спектральные области	256
9.2. Отражение и дифракция (преломление)	256
9.3. Поглощение	258
9.4. Электрон-фотонное взаимодействие	259
9.5. Переходы зона–зона	262
9.5.1. Связанная плотность состояний (262). 9.5.2. Прямые переходы (263).	
9.5.3. Непрямые переходы (265). 9.5.4. Хвосты Урбаха (267). 9.5.5. Внутри-	
зонное поглощение (268). 9.5.6. Аморфные полупроводники (269). 9.5.7. Эк-	
ситоны (269). 9.5.8. Фононное уширение (272). 9.5.9. Экситонные поляри-	
тоны (273). 9.5.10. Поглощение связанными экситонами (276). 9.5.11. Биэк-	
ситоны (278). 9.5.12. Трионы (278). 9.5.13. Сдвиг Бурштейна–Мосса (278).	
9.5.14. Перенормировка запрещенной зоны (279). 9.5.15. Электронно-дырочные	
капли (281). 9.5.16. Двухфотонное поглощение (282).	
9.6. Примесное поглощение	283
9.7. Поглощение на свободных носителях	286
9.8. Решеточное поглощение	289
9.8.1. Диэлектрическая постоянная (289). 9.8.2. Полоса остаточного излуче-	
ния (290). 9.8.3. Поляритоны (291). 9.8.4. Фонон-плазмонное взаимодей-	
ствие (292).	
10 Рекомбинация	293
10.1. Введение	293
10.2. Рекомбинация зона–зона	293
10.2.1. Спонтанная эмиссия (293). 10.2.2. Поглощение (294). 10.2.3. Сти-	
мулированная эмиссия фотона (295). 10.2.4. Результирующий темп реком-	
бинации (295). 10.2.5. Динамика рекомбинации (297). 10.2.6. Лазерный	
режим (297).	
10.3. Рекомбинация свободных экситонов	298
10.3.1. Свободные экситоны (298). 10.3.2. Рекомбинация связанных эксито-	
нов (298). 10.3.3. Уширение линий в сплавах (305).	
10.4. Фононные реплики	307
10.5. Самопоглощение	311
10.6. Переходы в донорно-акцепторных парах	312
10.7. Рекомбинация во внутренних уровнях примесных атомов	313
10.8. Оже-рекомбинация	313
10.9. Рекомбинация зона–примесь	315
10.9.1. Кинетика Шокли–Рида–Холла (315). 10.9.2. Многоуровневые ловуш-	
ки (318).	
10.10. Влияние поля	319
10.10.1. Термоактивационная эмиссия (319). 10.10.2. Прямое туннелирова-	
ние (319). 10.10.3. Облегченное туннелирование (320).	
10.11. Рекомбинация на протяженных дефектах	320
10.11.1. Поверхности (320). 10.11.2. Границы зерен (321). 10.11.3. Дисло-	
кации (321).	
10.12. Пространственные распределения (профили) избыточных носителей	322
10.12.1. Генерация на поверхности (322). 10.12.2. Генерация в объеме (322).	

II. Избранные главы

11	Гетероструктуры	327
11.1.	Введение	327
11.2.	Гетерозепитаксия	327
11.2.1.	Методы выращивания (327).	
11.2.2.	Подложки (328).	
11.2.3.	Эпитаксиальный рост (331).	
11.2.4.	Гетероподложки (332).	
11.2.5.	Псевдоморфные структуры (335).	
11.2.6.	Пластическая релаксация (335).	
11.2.7.	Активаторы поверхности (336).	
11.3.	Энергетические уровни в гетероструктурах	337
11.3.1.	Разрывы (скачки) зон в гетероструктурах (337).	
11.3.2.	Квантовые ямы (339).	
11.3.3.	Сверхрешетки (344).	
11.3.4.	Одиночный гетеропереход между легированными материалами (345).	
11.4.	Рекомбинация в квантовых ямах	347
11.4.1.	Зависимость от ширины (347).	
11.4.3.	Квантово-ограниченный эффект Штарка (352).	
11.5.	Изотопические сверхрешетки	352
11.6.	Сращивание пластин	353
12	Внешние поля	355
12.1.	Электрические поля	355
12.1.1.	Объемные материалы (355).	
12.1.2.	Квантовые ямы (357).	
12.2.	Магнитное поле	358
12.2.1.	Поглощение на свободных носителях (358).	
12.2.2.	Энергетические уровни в объемном кристалле (360).	
12.2.3.	Энергетические уровни в двумерном электронном газе (361).	
12.2.4.	Осцилляции Шубникова-де Гааза (363).	
12.3.	Квантовый эффект Холла	363
12.3.1.	Целочисленный квантовый эффект Холла (QHE) (364).	
12.3.2.	Дробный квантовый эффект Холла (368).	
12.3.3.	Осцилляции Вейса (369).	
13	Наноструктуры	371
13.1.	Введение	371
13.2.	Квантовые проволоки	371
13.2.1.	Квантовые проволоки на V-канавках (371).	
13.2.2.	Квантовые проволоки, полученные наращиванием на сколотых гранях (375).	
13.2.3.	Нановискеры (усы) (375).	
13.2.4.	Наноленты (377).	
13.2.5.	Квантование в двумерных потенциальных ямах (378).	
13.3.	Квантовые точки	379
13.3.1.	Квантование в трехмерных потенциальных ямах (379).	
13.3.2.	Электрические и транспортные свойства (382).	
13.3.3.	Самосборка квантовых точек (386).	
13.3.4.	Оптические свойства (392).	
14	Поляризующиеся полупроводники	396
14.1.	Введение	396
14.2.	Спонтанная поляризация	396
14.3.	Ферроэлектричество	397
14.3.1.	Материалы (399).	
14.3.2.	Мягкая фононная мода (399).	
14.3.3.	Фазовый переход (399).	
14.3.4.	Домены (402).	
14.3.5.	Оптические свойства (403).	
14.4.	Пьезоэлектричество	403

14.4.1. Пьезоэлектрический эффект (403).	14.4.2. Полупроводники со структурой цинковой обманки (404).	14.4.3. Вюртцитные кристаллы (404).	14.4.4. Пьезоэлектрические эффекты в наноструктурах (406).
15	Магнитные полупроводники		408
15.1.	Введение		408
15.2.	Магнитные полупроводники		408
15.3.	Разбавленные магнитные полупроводники		409
15.4.	Спинтроника		414
15.4.1.	Спиновый транзистор (414).	15.4.2. Спиновые светоизлучательные диоды (LED) (414).	
16	Органические полупроводники		416
16.1.	Материалы		416
16.1.1.	Малые органические молекулы, полимеры (416).	16.1.2. Органические полупроводниковые кристаллы (416).	
16.2.	Электронная структура		419
16.3.	Легирование		420
16.4.	Транспортные свойства		421
16.5.	Оптические свойства		422
17	Графен и углеродные нанотрубки		427
17.1.	Графен		427
17.1.1.	Структура (427).	17.1.2. Зонная структура (428).	17.1.3. Электрические свойства (431).
17.1.4.	Прочие двумерные кристаллы (434).		
17.2.	Углеродные нанотрубки		434
17.2.1.	Структура (434).	17.2.2. Зонная структура (436).	17.2.3. Оптические свойства (438).
17.2.4.	Другие неорганические нанотрубки (438).		
18	Диэлектрические структуры		440
18.1.	Материалы с фотонной шелью PBG		440
18.1.1.	Введение (440).	18.1.2. Общая теория одномерного рассеяния (440).	18.1.3. Переходы в N -периодическом потенциале (442).
18.1.4.	Четвертьволновая слоистая система (443).	18.1.5. Образование 3D зонной структуры (446).	18.1.6. Влияние разупорядочения (450).
18.1.7.	Моды, обусловленные дефектами (451).	18.1.8. Взаимодействие с электронными резонансами (453).	
18.2.	Микрорезонаторы		457
18.2.1.	Микродиски (457).	18.2.2. Эффект Парселла (458).	18.2.3. Деформационные резонаторы (460).
18.2.4.	Гексагональные резонаторы (463).		
19	Прозрачные проводящие оксидные полупроводники		465
19.1.	Материалы		465
19.2.	Свойства		467
III. Применения			
20	Диоды		471
20.1.	Введение		471
20.2.	Контакты типа металл–полупроводник		471

20.2.1. Зонная диаграмма в состоянии равновесия (472).	20.2.2. Область пространственного заряда (477).	20.2.3. Эффект Шоттки (479).	20.2.4. Емкость (481).	20.2.5. Вольт-амперная характеристика (483).	20.2.6. Омические контакты (492).	20.2.7. Металлические контакты к органическим полупроводникам (494).	
20.3. Диоды металл–диэлектрик–полупроводник							496
20.3.1. Зонная диаграмма идеального МДП-диода (497).	20.3.2. Область пространственного заряда (499).	20.3.3. Емкость (502).	20.3.4. Неидеальный МДП-диод (504).				
20.4. Биполярные диоды							505
20.4.1. Зонная диаграмма (505).	20.4.2. Область пространственного заряда (506).	20.4.3. Емкость (511).	20.4.5. Пробой (521).	20.4.6. Органические полупроводниковые диоды (525).			
20.5. Применения диодов и особые устройства на их основе							527
20.5.1. Выпрямление (527).	20.5.2. Смесители для преобразования сигналов (529).	20.5.3. Регулятор (параметрический стабилизатор) напряжения (530).	20.5.4. Диоды Зенера (532).	20.5.5. Варакторы (532).	20.5.6. Диоды с режимом восстановлением (импульсные диоды) (534).	20.5.7. Диоды с накоплением заряда (534).	20.5.8. рin-диоды (535).
	20.5.9. Туннельные диоды (536).	20.5.10. Обращенные диоды (539).	20.5.11. Диоды Ганна (539).	20.5.12. Диоды с гетеропереходом (540).			
21 Преобразование света в электричество.							542
21.1. Фотокатализ							542
21.2. Фоторезисторы							543
21.2.1. Введение (543).	21.2.2. Фоторезистивные детекторы (543).	21.2.3. Электрография (545).	21.2.4. Фотодетекторы на квантовых ямах (545).	21.2.5. Детекторы с блокированной примесной зоной (549).			
21.3. Фотодиоды.							551
21.3.1. Введение (551).	21.3.2. р–п-фотодиоды (552).	21.3.3. pin-фотодиоды (554).	21.3.4. Позиционно-чувствительный детектор (556).	21.3.5. МПМ-фотодиоды (556).	21.3.6. Лавинные фотодиоды (562).	21.3.7. Фотодетекторы бегущей волны (565).	21.3.8. Приборы с зарядовой связью (566).
	21.3.9. Фотодиодные массивы (572).						
21.4. Солнечные элементы							574
21.4.1. Солнечное излучение (574).	21.4.2. Идеальный солнечный элемент (575).	21.4.3. Реальные солнечные элементы (579).	21.4.4. Тонкости конструкции (579).	21.4.5. Модули (581).	21.4.7. Промышленный выпуск (586).		
22 Преобразование электричества в свет							587
22.1. Радиометрические и фотометрические величины							587
22.1.1. Радиометрические величины (587).	22.1.2. Фотометрические величины (587).						
22.2. Сцинтилляторы							588
22.2.1. Диаграмма цветности CIE (589).	22.2.2. Дисплеи (591).	22.2.3. Детектирование излучения (592).	22.2.4. Механизмы люминесценции (593).				
22.3. Светодиоды							594
22.3.1. Введение (594).	22.3.2. Спектральные диапазоны (594).	22.3.3. Квантовая эффективность (595).	22.3.4. Проектирование светодиодов (596).	22.3.5. Светодиоды с излучением белого света (600).	22.3.6. Светодиоды на квантовых точках (603).	22.3.7. Органические светодиоды (604).	
22.4. Лазеры							606

22.4.1. Введение (606). 22.4.2. Применение лазеров (608). 22.4.3. Усиление (609). 22.4.4. Оптическая мода (612). 22.4.5. Механизмы потерь (618). 22.4.6. Пороговый уровень (619). 22.4.7. Коэффициент спонтанного излучения (620). 22.4.8. Выходная мощность (621). 22.4.9. Температурная зависимость (623). 22.4.10. Спектр мод излучения (624). 22.4.11. Лазеры с одной продольной модой (625). 22.4.12. Лазеры с перестраиваемой длиной волны излучения (626). 22.4.13. Модуляция (628). 22.4.14. Лазеры, излучающие перпендикулярно поверхности (631). 22.4.15. Полупроводниковые лазеры с оптической накачкой (635). 22.4.16. Квантовые каскадные лазеры (636). 22.4.17. Лазеры на горячих дырках (637).

22.5. Полупроводниковые оптические усилители 638

23 Транзисторы 640

23.1. Введение 640

23.2. Биполярные транзисторы 641

23.2.1. Плотность носителей и токи (641). 23.2.2. Усиление по току (644). 23.2.3. Модель Эберса–Молла (645). 23.2.4. Вольт-амперные характеристики (647). 23.2.6. Частотные характеристики (650). 23.2.7. Гетеробиполярные транзисторы (650). 23.2.8. Светоизлучающие транзисторы (652).

23.3. Полевые транзисторы. 653

23.4. JFET- и MESFET-транзисторы 654

23.4.1. Основной принцип (654). 23.4.2. Статические характеристики (654). 23.4.3. Нормально открытые и нормально закрытые полевые транзисторы (657). 23.4.4. Подвижность, зависящая от поля (658). 23.4.5. Высококачественные свойства (660).

23.5. Полевые МОП-транзисторы 660

23.5.1. Принцип работы (660). 23.5.2. Вольт-амперные характеристики (663). 23.5.3. Типы полевых МОП-транзисторов (665). 23.5.4. Комплементарная МОП-технология (666). 23.5.5. Проблемы повышения степени интеграции (668). 23.5.6. Туннельный полевой транзистор (677). 23.5.7. Энергонезависимая память (677). 23.5.8. Полевые транзисторы на гетеропереходах (680).

23.6. Тонкопленочные транзисторы 684

23.6.1. Отжиг аморфного кремния (684). 23.6.2. Структура тонкопленочных полевых транзисторов (686). 23.6.3. Органические полевые транзисторы (687).

IV. Приложения

A Тензоры 691

B Пространственные группы 694

C Соотношения Крамерса–Кронига 696

D Сила осциллятора 698

E Квантовая статистика 703

F $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ -метод теории возмущений 706

G Теория эффективной массы 710

Список литературы 711

Предметный указатель 752