

Содержание

| | |
|---|-----------|
| Предисловие..... | 10 |
| Предисловие редактора перевода..... | 13 |
| Перечень символов..... | 15 |
| Список акронимов (сокращений)..... | 21 |
| | |
| Глава 1. Введение..... | 26 |
| | |
| Глава 2. III-N-материалы и современное состояние развития технологии изготовления приборов и схем..... | 28 |
| 2.1. Современное состояние исследований материалов..... | 28 |
| 2.1.1. Бинарные материалы..... | 30 |
| 2.1.2. Ограничения материалов..... | 47 |
| 2.1.3. Термические свойства и ограничения..... | 49 |
| 2.1.4. Тройные и четверные III-N-материалы..... | 50 |
| 2.2. Полярные полупроводники для электроники..... | 57 |
| 2.2.1. Спонтанная поляризация..... | 58 |
| 2.2.2. Пьезоэлектрическая поляризация..... | 60 |
| 2.2.3. Разработка приборов, использующих заряды, наведенные поляризацией..... | 63 |
| 2.2.4. Аналитические расчеты концентрации заряда в канале..... | 69 |
| 2.2.5. Примеры легирования..... | 70 |
| 2.2.6. Поверхности и границы раздела..... | 72 |
| 2.2.7. Транспортные свойства в поляризованных полупроводниках..... | 78 |
| 2.2.8. Приборы, основанные на поляризации, и их особые свойства..... | 80 |
| 2.3. Электрические и термические ограничения материалов и приборов..... | 81 |
| 2.3.1. Физическое моделирование приборов..... | 81 |
| 2.3.2. Приборы: показатели добротности..... | 85 |
| 2.3.3. III-N-приборы: частотная дисперсия..... | 87 |
| 2.4. Подложки для электронных приборов..... | 89 |
| 2.4.1. Критерий выбора подложек..... | 89 |
| 2.4.2. Подложки из карбида кремния..... | 91 |
| 2.4.3. Сапфировые подложки..... | 97 |
| 2.4.4. Кремниевые подложки..... | 98 |
| 2.4.5. Подложки на основе GaN и AlN..... | 99 |
| 2.5. Состояние разработок приборов и интегральных схем..... | 102 |
| 2.5.1. Диоды на основе нитридов..... | 102 |
| 2.5.2. Силовая электроника..... | 103 |
| 2.5.3. ВЧ-металл-полупроводниковые полевые транзисторы (MESFETs)..... | 105 |
| 2.5.4. Полевые транзисторы со структурой «металл—диэлектрик— полупроводник» (MISFETs)..... | 107 |
| 2.5.5. Транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMTs)..... | 109 |
| 2.5.6. Биполярные транзисторы с гетеропереходами (HBT)..... | 126 |
| 2.5.7. Технология создания ММІС НЕМТ..... | 129 |
| 2.6. Примеры применений..... | 131 |
| 2.6.1. Широкополосная связь..... | 132 |
| 2.6.2. Компоненты радиолокаторов..... | 132 |

| | |
|--|------------|
| 2.6.3. Применение электронных приборов в жестких условиях | 133 |
| 2.7. Проблемы | 134 |
| Литература | 135 |
| Глава 3. Эпитаксиальные процессы для создания электронных приборов на основе III-N-материалов | 163 |
| 3.1. Система материалов AlGaIn/GaN | 165 |
| 3.1.1. Осаждение из паров химических металлоорганических соединений (MOCVD) | 165 |
| 3.1.2. Молекулярно-лучевая эпитаксия (MBE) | 188 |
| 3.1.3. MOCVD- и MBE-рост на альтернативных подложках | 199 |
| 3.1.4. Боковое эпитаксиальное разращивание (ELO) | 200 |
| 3.1.5. Гидридная паро-фазовая эпитаксия (HVPE) | 201 |
| 3.2. Соединения и гетероструктуры на основе индия | 202 |
| 3.2.1. Выращивание слоев на основе индия методом MOCVD | 202 |
| 3.2.2. Выращивание слоев на основе индия методом MBE | 204 |
| 3.2.3. Выращивание гетероструктур на основе индия | 205 |
| 3.3. Легирование и дефекты | 206 |
| 3.3.1. Выращивание методом MOCVD | 207 |
| 3.3.2. Выращивание методом MBE | 210 |
| 3.4. Конструирование эпитаксиально выращенных приборов | 212 |
| 3.4.1. Рассмотрение геометрических параметров | 212 |
| 3.4.2. Выращивание верхних слоев («крыши») | 214 |
| 3.4.3. Легирование | 216 |
| 3.4.4. Промежуточный слой AlN | 216 |
| 3.4.5. Концепции канала | 218 |
| 3.4.6. Эпитаксиальная пассивация прибора в процессе изготовления (in-situ) | 219 |
| 3.5. Проблемы | 219 |
| Литература | 220 |
| Глава 4. Технологические процессы при изготовлении приборов | 232 |
| 4.1. Проблемы при проведении процессов | 232 |
| 4.2. Изоляция прибора | 236 |
| 4.2.1. Мезоструктуры | 236 |
| 4.2.2. Ионная имплантация для изоляции | 237 |
| 4.3. Формирование контакта | 238 |
| 4.3.1. Омические контакты | 238 |
| 4.3.2. Контакты Шоттки | 246 |
| 4.4. Литография | 253 |
| 4.4.1. Оптическая литография | 253 |
| 4.4.2. Электронно-лучевая литография | 255 |
| 4.4.3. Полевые платы и расширенные затворы | 256 |
| 4.5. Травление и процессы изготовления канавок | 263 |
| 4.5.1. «Сухое» травление | 263 |
| 4.5.2. «Мокрое» травление | 268 |
| 4.5.3. Процессы формирования канавок | 269 |
| 4.6. Формирование поверхности и пассивация прибора | 274 |
| 4.6.1. Пассивация участков прибора вне области затвора | 275 |
| 4.6.2. Физические механизмы образования ловушек | 277 |
| 4.6.3. Характеристики ловушек | 279 |
| 4.6.4. Технологические измерения: подготовка поверхности и диэлектриков | 284 |

| | |
|---|------------|
| 4.6.5. Компоненты процессов эпитаксии: подготовка поверхности и диэлектрики..... | 292 |
| 4.7. Затворные диэлектрики..... | 293 |
| 4.8. Проведение процессов для работы при высокой температуре..... | 296 |
| 4.9. Проведение процессов на обратной стороне подложки..... | 297 |
| 4.9.1. Технология утонения..... | 297 |
| 4.9.2. Травление сквозных отверстий малого диаметра и технологии сверления..... | 298 |
| 4.9.3. Металлизация сквозных микроотверстий..... | 301 |
| 4.10. Проблемы..... | 302 |
| Литература..... | 302 |
| Глава 5. Характеристики приборов и моделирование..... | 319 |
| 5.1. Характеристики приборов..... | 319 |
| 5.1.1. Краткий анализ FETs..... | 319 |
| 5.1.2. Краткий анализ биполярных приборов..... | 332 |
| 5.2. Частотная дисперсия..... | 335 |
| 5.2.1. Характеристики и эффекты дисперсии..... | 335 |
| 5.2.2. Характеристика и анализ дисперсии..... | 338 |
| 5.2.3. Модели для описания частотной дисперсии в приборах..... | 342 |
| 5.2.4. Подавление частотной дисперсии..... | 345 |
| 5.3. Характеризация, анализ и моделирование работы приборов на малых сигналах..... | 346 |
| 5.3.1. ВЧ-характеристики и инварианты..... | 346 |
| 5.3.2. НЕМТs с общим истоком..... | 347 |
| 5.3.3. НЕМТs с двойным затвором..... | 353 |
| 5.3.4. Характеристики при работе прибора в импульсном, постоянном и ВЧ-режимах..... | 354 |
| 5.3.5. Моделирование работы приборов на малых сигналах..... | 356 |
| 5.4. Анализ и моделирование работы прибора при подаче на вход сигнала с большой амплитудой..... | 362 |
| 5.4.1. Результаты измерений характеристик приборов при подаче на вход больших сигналов и нагрузки..... | 362 |
| 5.4.2. Моделирование работы приборов при подаче на вход большого сигнала..... | 369 |
| 5.5. Анализ и моделирование линейности..... | 385 |
| 5.5.1. Понимание основ..... | 386 |
| 5.5.2. Анализ линейности характеристик, присущих нитридам..... | 390 |
| 5.6. Анализ шума..... | 394 |
| 5.6.1. Низкочастотный шум..... | 394 |
| 5.6.2. Анализ и характеристики ВЧ-шума..... | 398 |
| 5.7. Проблемы..... | 403 |
| Литература..... | 403 |
| Глава 6. Рассмотрение схем и примеры III-N-устройств..... | 415 |
| 6.1. Моделирование пассивных схем..... | 415 |
| 6.1.1. Элементы передающей линии на основе копланарного волновода..... | 415 |
| 6.1.2. Элементы микрополосковой передающей линии..... | 418 |
| 6.2. Высоковольтные усилители большой мощности..... | 418 |
| 6.2.1. Основные принципы работы высоковольтных устройств большой мощности..... | 419 |
| 6.2.2. Общие соображения по конструированию III-N-усилителей..... | 425 |

| | |
|--|------------|
| 6.2.3. Усилители для мобильной связи в диапазоне частот между 500 МГц и 6 ГГц | 425 |
| 6.2.4. Усилители большой мощности С-диапазона частот | 433 |
| 6.2.5. Усилители большой мощности Х-диапазона | 435 |
| 6.2.6. Конструирование, величины импедансов и схемы настройки | 444 |
| 6.2.7. Широкодиапазонные высоколинейные усилители мощности на основе GaN | 448 |
| 6.2.8. Усилители мощности мм-диапазона частот на основе GaN | 451 |
| 6.3. Устойчивость работы маломощных усилителей на основе GaN | 452 |
| 6.3.1. Современное состояние развития технологии производства маломощных усилителей на основе GaN | 452 |
| 6.3.2. Примеры маломощных усилителей (LNA) на основе GaN MMIC | 454 |
| 6.4. Генераторы, смесители и аттенюаторы | 459 |
| 6.4.1. Генераторы | 459 |
| 6.4.2. Схемы смесителей на основе GaN HEMT | 460 |
| 6.4.3. Аттенюаторы и переключатели | 461 |
| 6.5. Проблемы | 462 |
| Литература | 462 |
| Глава 7. Проблемы надежности и работа при высокой температуре | 475 |
| 7.1. Обзор методов тестирования приборов и механизмов отказов | 475 |
| 7.1.1. Описание деградации приборов | 475 |
| 7.1.2. Механизмы деградации в III-N FETs | 479 |
| 7.1.3. Деградация III-N HBT-приборов | 482 |
| 7.2. Анализ механизмов специфической нитридной деградации | 483 |
| 7.2.1. DC-деградация | 484 |
| 7.2.2. ВЧ-деградация | 488 |
| 7.3. Анализ отказов | 491 |
| 7.3.1. Механизмы отказов | 492 |
| 7.3.2. Изучение случаев, связанных с надежностью | 495 |
| 7.4. Радиационные эффекты | 499 |
| 7.5. Работа при высокой температуре | 501 |
| 7.6. Проблемы | 505 |
| Литература | 506 |
| Глава 8. Интеграция, регулирование температуры и монтаж | 515 |
| 8.1. Технологии создания пассивных элементов MMIC | 515 |
| 8.1.1. Технологии пассивных элементов | 516 |
| 8.1.2. Технология микрополосковых элементов на обратной стороне подложки | 519 |
| 8.2. Проблемы интеграции | 520 |
| 8.3. Регулирование температуры | 522 |
| 8.3.1. Тепловой анализ | 522 |
| 8.3.2. Выбор материала с высокой теплопроводностью и тепловое моделирование | 526 |
| 8.3.3. Основные тепловые результаты, источники тепла и тепловые сопротивления | 529 |
| 8.3.4. Охлаждение обратной (задней) стороны пластины | 532 |
| 8.3.5. «Флип—чип»-интеграция | 536 |
| 8.3.6. Динамические термические эффекты | 538 |
| 8.4. Монтаж и корпусирование MMIC | 539 |

| | |
|--|------------|
| 8.4.1. Резка..... | 540 |
| 8.4.2. Крепление кристалла..... | 541 |
| 8.4.3. Выбор технологии монтажа и упаковки в корпус..... | 543 |
| 8.4.4. Тепловой менеджмент для устройств, формирующих параметры с линейными характеристиками..... | 545 |
| 8.4.5. Активное охлаждение..... | 549 |
| 8.5. Проблемы..... | 549 |
| Литература..... | 550 |
| Глава 9. Перспективы на будущее..... | 558 |
| Приложение..... | 560 |
| Свойства материалов бинарных соединений..... | 560 |
| Литература, добавленная при переводе книги..... | 561 |
| Транзисторы на GaN..... | 561 |
| Измерения, моделирование..... | 570 |
| Схемы с использованием GaN-транзисторов..... | 575 |
| Предметный указатель (по алфавиту)..... | 578 |

Нашему сыну Джонатану Бенедикту

В память Оливера Винтерера (1970—2006)

Предисловие

Системы электронной ВЧ-связи и датчиков сильно изменили нашу жизнь с тех пор, как был изобретен первый транзистор в 1947 году.

Совершенные полупроводниковые приборы являются ключевыми компонентами в электронных системах и, в конечном счете, определяют их характеристики.

В ходе этого непрекращающегося развития широкозонные нитридные полупроводники и гетероструктурные приборы на их основе проявили себя как уникальные претенденты на лидерство в будущих электронных системах вследствие выдающихся свойств этих материалов, обеспечивающих быстродействие, мощность, эффективность, линейность и надежность приборов. В то же самое время свойства этих материалов критичны по сравнению с другими материалами из-за высокой температуры выращивания и ряда особенностей их параметров.

Широкозонные полупроводники привлекают пристальное внимание в последние десять лет вследствие их использования в оптоэлектронике. Это направление быстро развивается благодаря крупным инвестициям в США, Японии и возросшей активности исследований в Европе. Некоторые полученные знания не могут быть доступны широкой публике из-за военных или гражданских ограничений. Тем не менее это направление связано с систематизацией и оценкой доступных материалов. Предлагаемая книга, несомненно, заинтересует студентов и аспирантов, специализирующихся в областях электроники, связи и физики; инженеров, работающих по специальности «приборы и интегральные схемы, применяющиеся в исследованиях и промышленности», и ученых с широким кругом интересов к сложной электронике.

Автор особенно благодарит тех людей, без кого и без чьего индивидуального вклада в такую сложную работу она была бы невыполнима. Он выражает особую благодарность:

- *профессору доктору Гюнтеру Вейману* — директору Фраунгоферского института прикладной твердотельной физики (ИПФ — IAF) за одобрение этой тематики, советы и постоянную поддержку;
- *профессору доктору Иоахиму Вагнеру* за одобрение начать этот проект;

- профессору доктору *Зигфриду Зельберхеру*, Институт микроэлектроники, ТУ Вена, за постоянное одобрение и поддержку работы;
- доктору *Микаэлю Шлехтвегу*, начальнику отдела ВЧ-приборов и интегральных схем во *Фраунгоферском ИПФ*, и доктору *Микаэлю Микулла*, начальнику отдела технологии во *Фраунгоферовском ИПФ*, за их великодушную поддержку;
- доктору *Рудольфу Киферу* за его выдающийся вклад и дельные советы по технологической главе, за его доброжелательность и продуктивное обсуждение;
- дипломированному физики *Стефану Мюллеру* и доктору *Клаусу Кёхлеру* за их ценный вклад в главу об эпитаксии и за коррекцию материалов при чтении.
- доктору *Фрейдберту ван Рэю* за коррекцию просмотренных материалов, за полезное обсуждение разделов по моделированию, измерению больших сигналов и разработку схем и за дискуссию при рассмотрении этих вопросов;
- доктору *Микаэлю Дамманну*, дипломированному инженеру *Хелмеру Констанзеру* и *Андреасу Михалову* за их вклад в работы по надежности приборов;
- доктору *Вольфгангу Броннеру* за его вклад в развитие технологии и рассмотрение процессов в SiC;
- доктору *Вильфриду Плетчену* за тщательную коррекцию просмотренных разделов и добрые советы, касающиеся правки этих разделов;
- доктору *Маттиасу Силману-Эгеберту* за его вдохновляющую работу по тепловому моделированию и моделированию больших сигналов;
- доктору *Патрику Волтерейту* за многочисленные полезные советы при обсуждении эпитаксии и развития этих процессов;
- дипломированному инженеру *Даниэлю Крауссе* за его работу по малошумящим усилителям;
- доктору *Василю Паланковски* и дипломированному инженеру *Станиславу Витанову*, ТУ Вена, за коррекцию предоставленных разделов книги и ценные советы при рассмотрении процессов моделирования приборов;
- доктору *Акселю Тессману* за его постоянную поддержку и ценные советы при рассмотрении технологии приборов мм-диапазона длин волн;
- *Маркусу Рисле* и доктору *Герберту Валчеру* за их вклад в обсуждение проблем монолитных микроволновых интегральных схем и операций корпусирования приборов;
- *Мартину Зинку* и *Ронни Кольбе* за терпение при подборе различных монолитных микроволновых интегральных схем;

- *дипломированному инженеру Кристофу Швёеру* за ценное обсуждение дизайна схем и за его вклад при рассмотрении проблем, связанных с широкодиапазонными усилителями;
- *доктору Лутцу Кирсте* за его помощь при рассмотрении кристаллических структур;
- *дипломированному инженеру Микаелю Кюри, дипломированному инженеру Германну Масслеру* и членам группы ВЧ-приборов и характеристик схем Фраунгоферовского ИПФ за их поддержку;
- *доктору Арнулфу Леунтеру* за мудрые советы и плодотворное сотрудничество при рассмотрении развития различных процессов;
- *Фоуаду Бенкхелифу* за его творческий вклад в рассмотрение технологии различных процессов и за активные дискуссии при обсуждении этих вопросов.

Далее я бы хотел поблагодарить сотрудников отдела ВЧ-приборов и схем, а также отдела технологии, особенно *доктора Гундруна Кауффеля и В. Ференбаха*.

Я хотел бы также поблагодарить *доктора Харди Следзика, доктора Патрика Шуа, доктора Ральфа Леберера и доктора Мартина Опперманна* из «EADC DE» (Ульм) за плодотворное сотрудничество и полезное обсуждение различных проблем, а также *дипломированного инженера Дирка Вейгнера, доктора Вольфганга Темпля и Ульриха Сейфрида* из Исследовательского центра «Алкатель-Люсент/Штутгарт» за плодотворное сотрудничество при рассмотрении суперлинейных мощных усилителей.

Благодарю также *доктора Томаса Рёдля* и его команду из НХП — исследовательского центра в Нимвегене, за плодотворное сотрудничество при рассмотрении технологии создания мощных усилителей.

Благодарю также команду Объединенных монокристаллических полупроводников (ОМП) за плодотворное сотрудничество при рассмотрении технологии приборов, *Марка ван Хейнингена и доктора Франка ван Флиета* ТНО Надежности и безопасности (Гаага, Нидерланды) за плодотворное сотрудничество при рассмотрении сверхмощных усилителей на основе Ka-связи.

Благодарю *Джойсе Висне* (Вена) за ее терпение при тщательной корректировке стиля книги и ее постоянную поддержку, команду издательства «Спрингер», особенно *Адельхейда Духма и доктора Клауса Асхерона* за их постоянную поддержку и доброе понимание, сотрудников «ле-текс», особенно *Штеффи Хохензее* за их постоянную поддержку.

Я благодарю свою жену Кристину и моего сына Джонатана, которым эта книга посвящена, за их бесконечное терпение.

*Freiburg i. Br.
Январь 2008*

Рюдигер Куэй.

Предисловие редактора перевода

В последние годы все большее внимание разработчиков транзисторов и комплексированных изделий на их основе концентрируется на использовании широкозонных материалов и гетероструктур. Среди них особое место занимают нитрид галлия (GaN) и гетероструктуры AlN/GaN, которые формируются на таких подложках, как карбид кремния, сапфир и кремний. Это связано с выдающимися электрофизическими свойствами GaN: высокой подвижностью и высокой скоростью насыщения электронов, высокими пробивными полями, достаточно высокой теплопроводностью и другими полезными свойствами. На основе гетероструктур AlN/GaN созданы полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT). Ранее в течение многих лет такие транзисторы создавались на арсениде галлия. Эти приборы работали в области сверхвысоких частот, однако низкая теплопроводность и малые пробивные поля не позволяли создавать на основе GaAs мощные высокочастотные транзисторы.

Достигнутый научно-технический и технологический уровень разработок позволяет рассматривать производство СВЧ-приборов на нитриде галлия на основе наноразмерных физических явлений как одну из основных инновационных технологий, способных вывести твердотельную СВЧ-электронику на качественно новый уровень. Внедрение СВЧ-приборов на новых полупроводниковых материалах позволяет существенно повысить уровень излучаемой мощности во всех частотных диапазонах и расширить диапазон частот выпускаемых изделий до КВЧ и ГВЧ. Поэтому издание книги Рюдигера Куэя, посвященное электронике, основанной на нитриде галлия, представляется нам весьма полезным. В книге рассматривается широкий круг вопросов, связанный с выбором подложек для гетероэпитаксии, с методами изготовления гетероэпитаксиальных структур, с технологией транзисторов на этих структурах. Рассматривается много типов транзисторов, способных работать в разных диапазонах сверхвысоких частот. Рассматриваются схемы, создаваемые на этих транзисторах. Особое внимание уделяется вопросам надежности СВЧ-транзисторов на основе нитрида галлия.

Книга по существу является обзором большого числа работ, опубликованных в периодических изданиях: в ней приводится более 1750 ссылок на техническую литературу. Учитывая, что с момента издания книги (2008 год) прошло уже несколько лет, мы дали в конце книги дополнительный (с индексом Д) перечень литературы, опубликованной в 2008—2011 гг. и посвященной аналогичной тематике. К сожалению, в книге отсутствуют какие-либо ссылки на техническую литературу, опубликованную на русском языке. В этой связи мы могли бы рекомендовать изданные в 2011 году на русском языке книги [Д1, Д2], причем книга

[Д2] распространена достаточно широко. В указанных изданиях имеется более двухсот ссылок на книги и статьи, опубликованные на русском языке.

При переводе мы старались сохранить термины и обозначения различных величин на английском языке так, как это приведено в оригинале, однако при рассмотрении перечня терминов и обозначений, приведенного в начале книги, мы дали русский перевод этих терминов и обозначений. Кроме того, мы считали, что такие сокращения, как HEMT, FET, HFET, MISFET, HBT, LDMOS, MOCVD, MBE и некоторые другие хорошо знакомы российским ученым, технологам и разработчикам транзисторов и соответствующей аппаратуры, и мы не считали необходимым по ходу текста книги переводить эти сокращения на русский язык.

В книге, к сожалению, встречаются ошибки и неточности, и там, где мы это заметили, мы дали соответствующие редакционные примечания. Кроме того, во многих местах автор книги говорит о токах или о мощности, приводя на самом деле численные значения плотности тока или плотности мощности. Чтобы в этом случае не давать много редакционных примечаний, мы внесли в текст соответствующие исправления.

Хотелось бы выразить благодарность д.т.н. Ю. В. Колковскому за помощь при редактировании гл. 5 и гл. 6, а также — инженеру Д. Г. Дроздову за помощь при подборе дополнительной литературы.

Надеемся, что перевод книги Рюдигера Куэя будет полезен для дальнейшего развития отечественной твердотельной СВЧ-электроники.

А. Г. Васильев

Перечень символов

- Δ — шаг, разность, приращение, изменение
 $\Delta E_v, \Delta E_c$ — разрыв валентной/проводящей зоны на границе гетероперехода
 ΔE_g — полная разность ширины запрещенной зоны на границе гетероперехода
 Δf — интервал частот
 ΔV — падение напряжения в обедненной зоне
 $\theta(T_0)$ — зависящее от температуры термосопротивление
 α_a, α_c — коэффициенты термического расширения вдоль a - и c - осей
 α_H — параметр Хоухе
 α_n, α_p — коэффициенты ударной ионизации для электронов и дырок
 β — коэффициент усиления по току в биполярных приборах
 γ_i — коэффициент инжекции эмиттера
 δ — фактор рекомбинации в базе
 ε — диэлектрическая проницаемость
 ε_{ij} — тензорные компоненты диэлектрика
 ε_o — диэлектрическая проницаемость вакуума
 ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость
 ε_r^{eff} — эффективная относительная диэлектрическая проницаемость
 ε_r^{inf} — относительная диэлектрическая проницаемость при $\omega \rightarrow \infty$
 k_L — теплопроводность решетки
 $k_L(T)$ — теплопроводность решетки как функция температуры
 k_{300}^A — теплопроводность материала А при 300 К
 μ_v — подвижность носителей типа v
 μ_{AB} — подвижность в тройном полупроводнике $A_x B_{1-x} N$
 τ — фазовая составляющая крутизны g_m
 ϕ_B — потенциал барьера Шоттки
 ψ — электростатический потенциал
 ρ_s — удельное сопротивление полупроводника
 ρ_c — удельное сопротивление металла
 σ_B — полный заряд на границе раздела между слоями
 $\sigma_{B,SP}$ — заряд на границе раздела вследствие спонтанной поляризации
 $\sigma_{B,PZ}$ — заряд на границе раздела вследствие пьезоэлектрической поляризации
 σ_A — удельная электропроводность полупроводника
 τ_D — задержка вследствие расширения истощенной зоны к стоку
 τ — малосигнальная фазовая постоянная
 τ_{RC} — RC-задержка в заряженной области канала
 ω — частота колебаний
 A — площадь
 A_R — постоянная Ричардсона

- A_v — коэффициент ударной ионизации для носителей ($v = n, p$)
 B — коэффициент излучательной рекомбинации
 B_o — объемный модуль упругости
 BV_{CEO} — напряжение пробоя между коллектором и эмиттером
 BV_{DS} — напряжение пробоя между стоком и истоком
 BV_{DSRF} — ВЧ-напряжение пробоя между стоком и истоком
 BV_{GD} — напряжение пробоя диода «затвор—сток»
 BV_{GS} — напряжение пробоя диода «затвор—исток»
 C_{ij} — упругие константы с индексами i, j
 C_{th} — теплоемкость
 C_{ds} — емкость «сток—исток»
 C_g — емкость затвора
 C_{gd} — емкость «затвор—сток»
 C_{gs} — емкость «затвор—исток»
 C_{jc} — емкость коллекторного перехода
 C_{je} — емкость эмиттерного перехода
 $C_{pds}, C_{pgs}, C_{pgd}$ — паразитные емкости «сток—исток», «затвор—исток» и «затвор—сток»
 C_0 — статическая емкость
 D_{nB}, D_{pE} — коэффициенты диффузии электронов в базу, дырок в эмиттер
 E — напряженность локального электрического поля
 E_A — энергия акцептора
 E_a — энергия активации
 E_{break} — напряженность поля пробоя
 E_{crit} — критическая напряженность поля
 E_C — энергия зоны проводимости
 $E_F(x)$ — энергия Ферми в позиции x
 E_g — энергетическая ширина запрещенной зоны
 $E_{g,\Gamma}$ — ширина запрещенной зоны в Γ -долине
 $E_{g,\Gamma_1}, E_{g,\Gamma_3}$ — ширина запрещенной зоны в Γ_1 и Γ_3 -долинах
 $E_{g,G-A}$ — ширина запрещенной зоны в G - A -долине
 $E_{g,L}$ — ширина запрещенной зоны в L -долине
 $E_{g,L-M}$ — ширина запрещенной зоны в L - M -долине
 $E_{g,X}$ — ширина запрещенной зоны в X -долине
 $E_{g,o}$ — ширина запрещенной зоны при $T_L = 0$ К
 E_V — энергия валентной зоны
 G_p — коэффициент усиления по мощности
 H — твердость
 I_o — параметр тока в диодном уравнении
 I_o — величина тока в момент времени $t = 0$

- I_B, I_C, I_E — токи базы, коллектора и эмиттера
 I_D — ток стока
 I_{Dmax}, I_{Dmin} — максимальная, минимальная величина тока стока
 I_{DmaxRt}, I_{DminRt} — максимальная/минимальная величина ВЧ-тока стока
 I_{DS} — ток в контуре «сток—исток»
 I_{Dpp} — полный размах колебаний тока стока (от максимума до минимума)
 I_{Dsat} — величина тока насыщения стока
 I_{DSS} — ток насыщения стока, обычно при $V_{GS} = 0$ Вольт
 I_G — ток затвора
 I_{ij} — величина тока в порте с индексами i, j
 I_{opt} — величина тока стока, оптимизированная по коэффициенту шумов
 K_{trg} — параметр мягкого пробоя при проколе
 K_C — вязкость разрушения
 L — длина канала
 L_e — длина эмиттера
 L_D, L_G, L_S — индуктивности стока, затвора и истока
 L_D — длина истощенной зоны
 L_{sb} — функция мягкого пробоя
 MAG — максимально возможный коэффициент усиления
 M_C — число эквивалентных минимумов в зоне проводимости
 MSG — максимальный стабильный коэффициент усиления
 $MTB\tau$ — среднее время перед отказом
 $MTT\tau$ — среднее время до отказа
 N_A — концентрация акцепторных примесей
 N_B — концентрация носителей в базе
 N_C — эффективная плотность состояний в зоне проводимости
 N_D — концентрация доноров
 N_{DC} — концентрация доноров в коллекторе
 N_E — концентрация носителей заряда в эмиттере
 N_F — коэффициент шума
 $N_{F,min}$ — минимальный коэффициент шума при оптимальном импедансе
 N_T — концентрация ловушек
 N_V — эффективная плотность состояний в валентной зоне
 P_i — функция в зарядовой модели
 PAE — коэффициент полезного действия (КПД)
 P_{-1dB} — выходная мощность при компрессии 1 децибел
 P_{DC} — мощность постоянного тока
 P_{diss} — рассеиваемая мощность
 P_{in} — входная мощность
 P_{out} — выходная мощность

- P_{SP} — спонтанная поляризация
 P_{PZ} — пьезоэлектрическая поляризация
 P_{sat} — выходная мощность насыщения
 R — резистор
 R_{Con} — сопротивление контакта
 R_D — сопротивление стока
 $R_{D,semi}$ — вклад полупроводника в R_D
 $R_{S,met}, R_{D,met}$ — вклад металла в величину сопротивлений R_S и R_D
 R_S, R_G, R_D — паразитные сопротивления истока, затвора и стока
 R_S — последовательное сопротивление в диоде
 R_{band} — вклад границы зоны в сопротивление истока R_S
 R_{bb} — сопротивление базы
 R_{chan} — сопротивление канала
 R_{ds} — величина сопротивления «ток—исток»
 R_{gap} — вклад контактного зазора в величину сопротивления R_{bb}
 R_{gd}, R_{gs} — сопротивление «затвор—сток», «затвор—исток»
 R_i — входное сопротивление
 R_n — эквивалентное сопротивление шума
 R_{on} — сопротивление при включении
 R_{opt} — оптимальный импеданс
 R_{spread} — вклад рассеяния в величину R_{bb}
 R_{th} — тепловое сопротивление
 $S_v(f)$ — спектральная плотность шумов
 T_{chan} — температура канала
 T_{Debye} — температура Дебая
 T_{Drain}, T_{Gate} — температура шумов стока и затвора
 $T(E_x)$ — вероятность туннелирования
 T_L — локальная температура решетки
 T_{sub} — температура подложки
 V_{BE}, V_{CE}, V_{BC} — напряжения база—эмиттер, коллектор—эмиттер и коллектор—база
 $V_{breakdown}$ — напряжение пробоя
 V_{DS}, V_{GD}, V_{GS} — напряжения в контурах «сток—исток», «затвор—сток», «затвор—исток»
 V_{DS0}, V_{GS0} — напряжения покоя в контурах «сток—исток», «затвор—исток»
 $V_{D,max,Rt}, V_{D,min,Rt}$ — максимальное/минимальное ВЧ- V_{DS} -напряжение между стоком и истоком
 V_{dgt} — функция напряжения между затвором и стоком
 $V_{k,l}$ — напряжение на порте прибора k, l
 V_p — напряжение прокола

- V_{pZ} — пороговое напряжение, скорректированное легированием
 V_{th} — пороговое напряжение
 W — прогиб пластины
 W_e, W_{cb} — ширина эмиттера (базы)
 W_g — ширина затвора
 X_{EB}, X_E — толщина эмиттера, базы
 Y_{ij} — Y -параметр для $i, j = 1, 2$
 Z_{ds} — комплексная выходная проводимость
 Z_0 — характеристика импеданса
 a_o, c_o — параметры кристаллической решетки
 c_{300} — теплоемкость при 300 К
 $c_{L,AB}$ — нелинейный коэффициент теплопроводности тройного полупроводника
 d — толщина, длина
 d_{AlGaN} — толщина слоя AlGaN
 d_{doping} — толщина слоя канала
 d_{sub} — диаметр подложки
 e_{ij} — пьезоэлектрический коэффициент
 f_T — частота среза коэффициента усиления по току
 f — частота
 f_{max} — максимальная частота колебаний
 f_{10db} — максимальная частота, соответствующая усилению по мощности 10 dB
 $f(t, \mu, \sigma)_{\lognorm}$ — логарифмически нормальная функция распределения
 $f(t, \mu, \sigma)_{norm}$ — нормальная функция распределения
 f_1, f_2 — функции распределения
 g_{ds} — выходная проводимость
 g'_{ds}, g''_{ds} — производные выходной проводимости
 g_m — (комплексная) крутизна
 g'_m, g''_m — производные комплексной крутизны
 g_{mi} — собственная крутизна
 $g_{m,max}$ — максимальная крутизна
 h, \hbar — постоянные Планка
 h_{21} — коэффициент усиления по току
 i_{ds} — ток собственных носителей «сток—исток»
 i_d, i_g — шумовой ток стока и затвора
 k_B — постоянная Больцмана
 k_f — фактор Фукуи
 $k_n, k_{rel,n}$ — дисперсия запаздывания в модели параметров стока
 k — фактор стабильности
 l_{fps}, l_{fpd} — расширения полевой платы к истоку и стоку

l_{gg} — шаг «затвор—затвор»

l_g — длина затвора

m_e — масса свободного электрона

m_n — эффективная масса электрона

$m_n(\Gamma-K), m_n(\Gamma-A), m_n(\Gamma-M)$ — эффективная масса электрона при переходах $(\Gamma-K), (\Gamma-A)/(\Gamma-M)$

$m_n(x)$ — эффективная масса электрона в X -долине

$m_{v,AB}$ — эффективная масса носителя заряда полупроводника вида $A_xB_{1-x}N$

$m_{n,l}$ — продольная эффективная масса электрона

$m_{n,t}$ — поперечная эффективная масса электрона

m_p — эффективная масса дырки

$m_{p,h}$ — эффективная масса тяжелой дырки

$m_{p,l}$ — масса легкой дырки

m^* — туннельная масса

n — концентрация электронов

n — показатель преломления

$n_{channel}$ — плотность заряда в канале

n_i — концентрация собственных носителей заряда

n_{sheet} — концентрация носителей в слое

p — концентрация дырок

q — элементарный заряд

$q_{bulk,traps}$ — заряд объемных ловушек

$q_{channel}$ — заряд в канале

$q_{diel,interface}$ — заряд границы раздела

q_{doping} — заряд легирующей примеси

$q_{initial}$ — динамический заряд

$q_{semi,interfaces}$ — заряд на границах раздела полупроводника

t — время

t_{sem} — толщина полупроводника

t_{sub} — толщина подложки

t_{subm} — толщина барьера

v_{eff} — эффективная скорость носителей заряда

v_{peak} — максимальная скорость носителей заряда

v_{sat} — скорость носителей заряда при насыщении

x, y — координатные параметры материала

Список акронимов (сокращений)

- 2DEG — двумерный электронный газ
3G — 3-е поколение (мобильной связи)
4G — 4-е поколение (мобильной связи)
4H, 6H — политипы SiC
AC — переменный ток
ACLR — коэффициент утечки мощности в соседний канал
ACPR — отношение мощностей в основном и соседнем каналах
AFM — микроскоп атомных сил
AlN — нитрид алюминия
BCB — бензоциклобутен
BEEM — баллистическая эмиссионная электронная спектроскопия
BJT — биполярный транзистор
BN — нитрид бора
BS — охлаждение обратной стороны
BV — напряжение пробоя
CAD — конструирование с помощью компьютера
SAFM — микроскоп атомных сил для проводящих материалов
CAIBE — ионно-лучевое травление, сопровождающееся химическими реакциями
CAT-CVD — каталитическое осаждение химических соединений из паровой фазы
CAVET — вертикальный транзистор с токовой апертурой
CDMA — множественный доступ с кодовым разделением каналов
CMOS — комплементарная МОП-структура
CMP — химико-механическая полировка
CTE — коэффициент термического расширения
CVD — осаждение химических соединений из паровой фазы
CW — незатухающая волна
c — кубический
DBF — цифровое формирование луча
DC — постоянный ток
DD — дрейфовая диффузия
DLT(F)S — Фурье-спектроскопия глубоких уровней
DNBT — двухпереходный биполярный транзистор
DNFET — двухпереходный полевой транзистор
DNHEMT — двухпереходный HEMT
DOD — Департамент безопасности США
DPD — цифровой предсказатель

- DRA — драйверный усилитель
EBIC — наведенный ток электронного луча
ECR — электронно-циклотронный резонанс
ECMP — механико-электрохимическая полировка
EDGE — усовершенствованные скорости передачи данных для развития глобальной системы мобильной связи
EDX — электронная дифракция
EER — конверт удаления и восстановления (дополнительные управляющие биты)
ELO, ELOG, LEO — боковое эпитаксиальное наращивание (разращивание)
ESD — электростатический заряд
ET — отслеживание огибающей сигнала
EUV — экстремальный ультрафиолет
EVM — величина вектора ошибки
FC — метод «флип-чип»
FET — полевой транзистор
FIB — сфокусированный ионный пучок
FIT — временные отказы
FOM — показатель качества
GaAs — арсенид галлия
GaN — нитрид галлия
GCPW — заземленный копланарный волновод
GSM — глобальная система для мобильной связи
HBT — гетеропереходный биполярный транзистор
HCI — инжекция «горячих» носителей заряда
HFET — гетеропереходный полевой транзистор
HPA — высокомошнный усилитель
HPSI — высокочистые полуизолирующие (подложки)
HR — большое удельное сопротивление
HTCC — высокотемпературная обожженная керамика
HTCVD — высокотемпературное CVD
HVPE — гидридная паровая фазовая эпитаксия
IC — интегральная схема
ICP — индуктивно-связанная плазма
IDLDMOS — межразрядный с боковым диффундированием сток на основе МОП-структуры
IF — промежуточная частота
II — ударная ионизация
IMPATT — пролет при лавинном пробое
InAlN — нитрид индия-алюминия

InAs — арсенид индия
InGaN — нитрид индия-галлия
InN — нитрид индия
JFET — полевой транзистор с *pn*-переходом
LDMOS — МОП-структура с боковым диффундированием
LED — светоизлучающий диод
LEEN — наноразмерная электронная люминесцентная спектроскопия в области низких энергий электронов
LNA — маломощный усилитель
LO — локальный осциллятор
LPCVD — CVD при низком давлении
LT — низкая температура
LTCC — керамика, спеченная при низкой температуре
MAG — максимально возможный коэффициент усиления
MBE — молекулярно-лучевая эпитаксия
MC — Монте-Карло
MCM — мультичиповый модуль
MEMS — микроэлектромеханические системы (МЭМС)
MERFS — микроэлектромагнитная радиочастотная система
MESFET — металл-полупроводниковый полевой транзистор
MHEMT — метаморфный HEMT
MIC — СВЧ-интегральная схема (ИС)
MIM — металл—изолятор—металл (МДМ-структура)
MISFET—полевойтранзисторсоструктуройметалл—изолятор—полупроводник (МДП)
MISHEMT — МДП HEMT
MMIC — монолитная СВЧ интегральная схема (ИС)
MOCVD — химическое осаждение из паровой фазы из металлоорганических соединений
MOD — министерство безопасности
MODFET — модуляционно-легированный полевой транзистор
MOMBE — молекулярнолучевая эпитаксия из металлоорганических соединений
MOS — металл—оксид—полупроводник (МОП-структура)
MOSFET — полевой транзистор с МОП-структурой
MOSDHFET — МОП-полевой транзистор с двумя гетероструктурами
MOVPE — металлоорганическая эпитаксия из паровой фазы
MSG — максимально стабильный коэффициент усиления
MSL — микрополосковая линия
MTBF — среднее время до отказа

- MTTF — среднее время до разрушения
NBVI — температурная нестабильность при отрицательном напряжении смещения
NID — неумышленное легирование
NiCr — нихром
ONO — структура «оксид—нитрид—оксид»
PA — усилитель мощности
PAE — коэффициент полезного действия (КПД)
PAMBE — молекулярно-лучевая эпитаксия, сопровождаемая плазменным возбуждением
PAR — отношение пикового (максимального) значения к среднему
PAS — позитрон-аннигиляционная спектроскопия
PCB — питание печатной платы схемы
PCDE — ошибка пикового кода домена, ошибка выхода за пределы области
PEC — фотоэлектрохимическое травление
PECVD — плазмо-стимулированное осаждение из паровой фазы химических соединений
PHEMT — псевдоморфный HEMT
PIC — заряд, наведенный поляризацией
PL — фотолюминесценция
PLM — поляризационная микроскопия
PVT — физическое осаждение из паровой фазы
RF — радиочастота
RIE — реактивное ионное травление
RMS — среднеквадратичная площадь
RTA — быстрый термический отжиг
Rx — радиоприемник
SAR — радиолокатор с синтезированной апертурой
SAW — поверхностно-акустическая волна
SEM — сканирующий электронный микроскоп
SH — самонагрев
SHBT — биполярный транзистор с одним гетеропереходом
SHFET — полевой транзистор с одним гетеропереходом
SHHEMT — HEMT с одним гетеропереходом
s.i., SI — полуизолирующий
SiC — карбид кремния
SiCOI — карбид кремния на изоляторе
SiCoSiC — карбид кремния на поликарбиде кремния
SIMS — вторичная ионная масс-спектрометрия
SiN — нитрид кремния

SIP — система в упаковке
SIT — транзистор со статической индукцией
SKPM — сканирующая микроскопия с зондом Кельвина
SMD — прибор, закрепленный на поверхности
SoC — система на чипе (ИС)
SOI — кремний на изоляторе (КНИ-структура)
SiCoSiC — кремний на поликристаллическом карбиде кремния
SPDT — однополюсный переключатель на два направления (рубильник)
SRPES — синхротронная радиационная фотоэмиссионная спектроскопия
SRH — Шокли — Рид — Холл
SSPA — твердотельный усилитель мощности
STEM — сканирующая туннельная электронная микроскопия
TaN — нитрид тантала
TDD — плотность винтовых дислокаций
TE — термоионная эмиссия
TEM — просвечивающая электронная микроскопия
TMGa, TMAI, TMIn — триметилгаллий, триметилалюминий, триметилиндий
T/R, TRX — передатчик/приемник
TWA — усилитель бегущей волны
TWTA — волноводный усилитель бегущей волны
UWB — ультраширокая полоса
VCO — осциллятор, управляемый напряжением
WBG — широкая запрещенная зона
WBS — полупроводник с широкой запрещенной зоной
WCDMA — широкополосный множественный доступ с кодовым разделением каналов
WiMAX — протокол широкополосной радиосвязи, глобальная совместимость для доступа микроволнового (СВЧ) диапазона
Wz — вюрцит
XRD — дифракция рентгеновских лучей
Zb — цинковая обманка

ГЛАВА I

ВВЕДЕНИЕ

Эта монография посвящена развитию электроники, основанной на III-N-полупроводниках для мощных и высокочастотных применений. Обсуждаются свойства этих полярных материалов, состояние развития технологии изготовления подложек, эпитаксиальный рост, технологии изготовления приборов и проведения процессов, моделирование и интеграция схем, а также примеры. Целая глава посвящена критическим аспектам надежности приборов. Работа завершается рассмотрением аспектов интеграции и упаковки, с учетом специфики новых свойств схем на основе III-N-материалов, а также subsystem на их основе.

Во второй главе представлены общие свойства материалов и явления переноса в них, их преимущества, а также теоретические ограничения, связанные с электрическими и термическими свойствами. Затем делается систематический обзор современного состояния развития подложек, материалов, электронных приборов и схем на основе нитридов.

Что касается эпитаксиального выращивания, то как бинарные, так и тройные соединения на основе алюминия и индия представлены с особым вниманием в главе 3 на примере AlGaIn/GaN- и In-GaN-гетероструктурных систем.

Систематически анализируются такие способы эпитаксиального выращивания, как молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) и химическое осаждение из паровой фазы при использовании металлоорганических соединений (MOCVD). Анализируются специфические характеристики нитридных материалов, легирование и их качество.

Систематически делаются обзоры свойств подложек на их соответствие требованиям электроники.

По ходу повествования важное внимание уделяется транзисторам с повышенной подвижностью электронов (HEMT) с длиной затвора менее 30 нм и частотой среза вплоть до 190 ГГц. Таким образом, обсуждаются специальные проблемы этого класса приборов, такие как контакты Шоттки и омические контакты, литография на оптически прозрачных материалах. Анализируется современное состояние развития процессов удаления слоев материала и технологии пассивации. Делается обзор примеров, касающихся технологии биполярных транзисторов и других приборов.

В главе 5, посвященной моделированию и характеристикам, представлены характеристики и модели приборов при работе на постоянном токе, характери-



стики слабых сигналов и шумовых в соответствии с вопросами, посвященными специальным нитридным материалам. Поскольку частотная дисперсия является основным источником информации о совершенстве и деградации прибора, обсуждаются характеристики и способы уменьшения дисперсии, включая импульсные характеристики и другую сложную технику. Для нитридных материалов и приборов обсуждаются характеристики и моделирование при использовании на их основе больших сигналов, включая моделирование контактов, диодов, дисперсию и термические аспекты.

В главе 6 обсуждаются примеры построения схем для ВЧ-усилителей большой мощности с акцентом на увеличенный импеданс, тепловые ограничения и управление ВЧ-мощностью в интервале частот между 0,5 и 100 ГГц. Представлены малошумящие усилители и анализируются их свойства в высокочастотном диапазоне, надежность и высокая линейность коэффициента усиления. В последней части главы рассматриваются функции других схем, таких как смесители и генераторы. Повторно рассматриваются достоинства и конкурентные преимущества специальных нитридных материалов.

В главе 7 систематически анализируются надежность и механизмы отказов приборов и схем на основе нитридных материалов. В последней части представлены соображения по интеграции и упаковке, термкреплению и термоупаковке, отвечающие современному состоянию усилителей и субсистем.

ГЛАВА 2

III-N-МАТЕРИАЛЫ И СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРИБОРОВ И СХЕМ

В этой главе представлены общие свойства материалов и явлений переноса заряда, достоинства, теоретические электрические и термические ограничения нитридных полупроводников в соответствии с применениями в электронике. В этой главе дан обзор материалов подложек. Систематически делаются обзоры современного состояния материалов, электронных приборов и схем на основе нитридных материалов. В последней части дана характеристика специальных требований по применению приборов на основе нитридных полупроводников с точки зрения большого числа систем. Глава завершается рассмотрением ряда проблем.

2.1. Современное состояние исследований материалов

Далее дан систематический обзор свойств материалов. Для систематизации на рис. 2.1 показана ширина запрещенной зоны при температуре решетки 300 К для различных полупроводниковых материалов как функция постоянных решетки.

Выбор в качестве константы для рассмотренных специфических материалов, не обладающих центром симметрии постоянной кристаллической решетки, можно считать произвольным, однако он полезен для систематического введения. С интервалом значений ширин запрещенной зоны для InN около 0,8 эВ, как недавно предположили, до 6,2 эВ для AlN при комнатной температуре системы на основе материалов III-N охватывают очень широкий диапазон значений энергии, и поэтому длины волн эмитируемого излучения находятся в диапазоне от инфракрасного до глубокого ультрафиолета и вне конкуренции

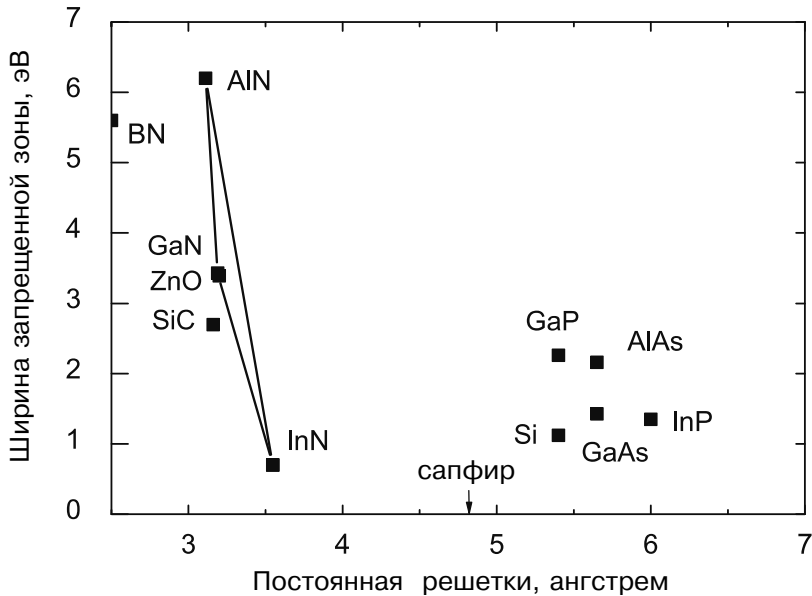


Рис. 2.1. Связь ширины запрещенной зоны при $T_{\text{реш}} = 300$ К с постоянными решетками для III-N-полупроводников. Другие III-V-полупроводники даны для сравнения

по сравнению с любыми другими материалами. Электронными методами было обнаружено, что очень широкий диапазон значений ширины запрещенной зоны ведет к очень высоким значениям напряжения пробоя для объемных материалов, а это может быть полезным для полупроводников с малой эффективной массой, как, например, для GaN с $m_n = 0,2 m_c$ или даже для InN с $m_n = 0,11 m_c$ (потенциально даже с $m_n = 0,04 m_c$ [2.122]), при этом большая подвижность электронов реализуется путем изменения состава материалов в гетероструктурах. В то же самое время второе достоинство — это их близость в отличие от любых других систем полупроводниковых материалов. Вследствие сильных поляризационных свойств материалов модификации состава материала приводят к впечатляющим модификациям полярных свойств кристаллов и, таким образом, на границах раздела, а потом и в приборах реализуются нужные концентрации носителей заряда. Таким образом, и в некотором отношении это очень похоже на кремний, огромный успех III-N-материалов основан не только на параметрах переноса зарядов в объемном материале (отметим, что параметры p -материалов не могут сравниваться с n -свойствами в III-N-материалах), а вследствие свойств границы раздела. В случае кремния успех основан на существовании природного оксида, который может быть оптимизирован и использован с успехом [2.411] и который может быть заменен другими диэлектриками, которые также хорошо применимы на кремнии [2.136, 2.145].

В случае III-N-гетероструктур границы раздела дают возможность формировать n -каналы и обеспечивать крайне высокую двумерную концентрацию носителей заряда $\geq 10^{13}$ см⁻² благодаря поляризации без последующего введения легирующих примесей. С другой стороны, в отличие от кремния, границы раздела «полупроводник—диэлектрик» не могут в III-N-материалах быть столь совершенными. Подходящие границы раздела могут быть практически сформированы, однако эти границы раздела и их поведение в долгосрочной перспективе не очень хорошо понятны, прежде всего вследствие высокой концентрации ловушек.

2.1.1. Бинарные материалы

Бинарные соединения элементов Al-In-Ga-B-N представляют собой основные материалы для класса полупроводниковых материалов, называемых нитридами: нитрид галлия (GaN), нитрид алюминия (AlN), нитрид индия (InN) и нитрид бора (BN). Эпитаксиально выращиваемый нитрид кремния (SiN) хотя не соответствует качеству монокристалла, может быть иногда добавлен в этот список. Нитрид бора (BN) еще относительно «незрелый» как полупроводниковый материал [2.99]. Первые результаты по уровню свойств материала и приборов получены в [2.99], отличительная черта — это особо хорошая теплопроводность BN, вторая по величине после алмаза при сравнении полупроводниковых материалов. Доступны хорошие обзорные статьи и подборки материалов с акцентом также на оптоэлектронные и общие свойства материалов, например [2.100, 2.101, 2.244, 2.315, 2.324, 2.369, 2.389]. Лазерные диоды рассматриваются в [2.323]. Обзор свойств SiN и SiO₂ представлен в [2.440].

Кристаллические структуры для применений в электронике

Полупроводники на основе III-N-материалов могут иметь одну из трех кристаллических структур: структуры типа вюрцита, типа цинковой обманки и типа каменной соли.

При комнатной температуре GaN, AlN и InN обладают структурой типа вюрцита, в то время как BN имеет преимущественно кубическую структуру. Структуру типа цинковой обманки можно также обнаружить в тонких пленках GaN и InN, в то время как для AlN не обнаружено стабильной фазы со структурой типа цинковой обманки [2.99]. Однако эту работу можно рассматривать как наилучшую с теоретической точки зрения по структуре Zb (цинковая обманка) — AlN. Фаза со структурой каменной соли, как будет показано в дальнейшем, не имеет значения с точки зрения применений в электронике. В структуре вюрцита рост обычно происходит вдоль c -осей. Недавно появилось сообщение о росте вдоль m -плоскости [2.61, 2.342]. Полученный в результате этого неполярный материал положительно повлиял на эффективность светодиодов в оптоэлектронике.

Нитрид галлия (GaN)

Нитрид галлия (GaN) — это основной материал из рассмотренного класса материалов, и он обычно используется во всех приборных слоях, требующих быстрого переноса носителей заряда и высокого напряжения пробоя. GaN используется как материал канала в различных полевых транзисторах, а также как основной материал в AlGaN/GaN-биполярных транзисторах с гетеропереходом, см. например [2.311]. Большинство слоев для формирования омических контактов в любых приборах включает в себя *n*-легированный и *p*-легированный GaN. GaN в дальнейшем смогут выращивать как полуизолирующий материал с параметрами роста, близкими к аналогичным параметрам полупроводниковых слоев.

Механические и оптические свойства

Кристаллические структуры, а также механические и термические свойства GaN обсуждаются в целом ряде публикаций, например, в [2.4, 2.244, 2.315, 2.389]. Данные о всех III-N-бинарных соединениях также собраны в прилагаемых таблицах. В первую очередь в табл. 2.1 представлены значения плотности. Значения твердости по Виккерсу и вязкость разрушения объемного GaN по сравнению с другими полупроводниками даны в [2.92]. Более свежие результаты представлены в [2.524]. В табл. 2.2 представлены сравнительные величины твердости H и вязкости разрушения K_c .

c-BN — это особо твердый материал, в то время как GaN, AlN и InN обладают приблизительно одинаковой твердостью. Такая твердость делает *c*-BN привлекательным для использования в различных керамических материалах. Постоянные упругости нитрида галлия со структурой вюрцита были определены методом рассеяния по Бриллюэну и представлены, например, в [2.372] и обобщены в табл. 2.3. Вычисленные высокотемпературные постоянные упру-

Таблица 2.1. Плотность III-N-материалов и других полупроводников

| Материал | GaN (Wz) | AlN (Wz) | InN (Wz) | BN (c) | Si | Ссылки |
|--|-------------|-------------|-------------|-----------|------|---------------------|
| Массовая плотность (г см ⁻³) | 6,1 | 3,23 | 6,81 | 3,48 | 2,33 | [2.17, 2.99, 2.443] |

Wz — вюрцит, *Zb* — цинковая обманка, *c* — кубическая, *d* — алмаз.

Таблица 2.2. Значения твердости по Виккерсу H и вязкость разрушения K_c III-N-материалов и других полупроводников

| Материал | GaN (Wz) | AlN (Wz) | InN (Wz) | BN (c) | SiC | Si | Ссылки |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----|-----|---------------|
| H (ГПа) | 12 | 14 | 11,2 | 55—65 | 33 | 9 | [2.92, 2.451] |
| K_c (МПа м ^{1/2}) | 0,8 | 2,6 | — | — | 3,3 | 0,7 | [2.92, 2.244] |

Таблица 2.3. Постоянные упругости III-N-полупроводников со структурой вюрцита и других материалов

| | GaN (Wz) | AlN (Wz) | InN (Wz) | BN (c) | Ссылки |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|------------------------------------|
| C_{11} (GPa) | 390 | 396 | 223 | 831 | [2.99, 2.275, 2.372, 2.449, 2.485] |
| C_{33} (GPa) | 398 | 373 | 200 | — | [2.99, 2.275, 2.372, 2.449, 2.485] |
| C_{44} (GPa) | 105 | 116 | 48 | 450 | [2.372, 2.451, 2.485] |
| C_{12} (GPa) | 145 | 137 | 115 | 190 | [2.99, 2.275, 2.372, 2.449, 2.485] |
| C_{13} (GPa) | 106 | 108 | 92 | — | [2.275, 2.372, 2.449, 2.485] |

Wz — вюрцит, c — кубич.

Таблица 2.4. Постоянные упругости III-N-полупроводников со структурой цинковой обманки

| | GaN (Zb) | AlN (Zb) | InN (Zb) | BN (c) | Si | Ссылки |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|-------|-----------------------|
| C_{11} (ГПа) | 293 | 304 | 187 | 820 | 165,8 | [2.244, 2.371, 2.485] |
| C_{44} (ГПа) | 155 | 193 | 86 | 480 | 79,6 | [2.244, 2.371, 2.485] |
| C_{12} (ГПа) | 159 | 160 | 125 | 190 | 63,9 | [2.244, 2.371, 2.485] |

Wz — вюрцит, Zb — цинковая обманка, c — кубич.

Таблица 2.5. Коэффициенты термического расширения (КТР) III-N-полупроводников и других материалов при комнатной температуре

| Материал | GaN (Wz) | GaN (Sa) | AlN (p) | InN (p) | BN (c) | SiC | Sap. | Si | Ссылки |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|---------------|-----|------|-----|----------------------|
| $\alpha_a (10^{-6} K^{-1})$ | 3,1 | 3,8 | 2,9 | 3,6 | 1,15 | 3,2 | 4,3 | 2,6 | [2.99, 2.222, 2.243] |
| $\alpha_c (10^{-6} K^{-1})$ | 2,8 | 2,9 | 3,4 | 2,6 | — | 3,2 | 3,2 | 2,6 | [2.222, 2.243] |

Wz — вюрцит, Sa — эпитаксия на сапфировой подложке, c — кубический, p — порошок.

гости GaN, AlN и InN даны в [2.381]. На основании этих данных было определено значение модуля объемной деформации B_0 для GaN; его величина составила 210 ГПа. Для BN сравнение различных рассчитанных и измеренных величин дано в [2.99]. Первые принципиальные расчеты свойств AlN и GaN со структурой цинковой обманки даны в [2.177]. Постоянные упругости фазы цинковой обманки обобщены в табл. 2.4. Зависимость значений постоянных упругости BN, AlN, GaN и InN со структурой цинковой обманки от давления анализируется в [2.178].

Линейные коэффициенты термического расширения (КТР) при комнатной и высоких температурах важны для процессов выращивания. Так, значения для вюрцитной структуры GaN измерены в интервале от комнатной температуры до ≥ 750 К как для объемного GaN, так и для эпитаксиальных слоев, выращенных на сапфире, например, в [2.243]. Данные обобщены в табл. 2.5. В табл. 2.5

далее сравниваются КТР III-N-полупроводников с карбидом кремния и другими типичными материалами подложки. Отличия в КТР и их температурных зависимостях, так же как и различия в постоянных решетки, имеют аналогичное влияние на выращивание гетероструктур; это обсуждается в главе 3. Теплопроводность GaN впервые была представлена в [2.423], и многие ссылаются на эту публикацию. Более поздние измерения, особенно зависимость этого параметра от плотности дислокаций в тонких пленках, отражены в [2.120, 2.216, 2.264] и обсуждаются при рассмотрении моделирования и качества кристаллов. Соответствующие данные представлены в табл. 2.16.

Диэлектрические постоянные

В табл. 2.6 для сравнения диэлектрических свойств приведены величины как статических, так и высокочастотных диэлектрических постоянных. Диэлектрическая постоянная GaN немного ниже, чем у кремния и GaAs (для GaAs не показана). У InN — самые высокие значения этой величины среди рассмотренных трех бинарных материалов.

Обзоры других оптических параметров GaN, таких как показатель преломления, даны в [2.3, 2.298]. Спектр поглощения и коэффициенты поглощения представлены в [2.64].

Основные транспортные свойства

Транспортные свойства электронов в GaN в основном ясны, но ряд вопросов требует дальнейших исследований. Они включают, например, вопросы о максимальной скорости переноса v_{peak} в объемном материале и на границах раздела гетеропереходов, которые обсуждаются ниже. Основные электрические свойства GaN, а также AlN и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ изложены в [2.123]. Ранняя, но точная оценка зависимости подвижности от концентрации носителей заряда в объемном материале GaN, InN и AlN на основе использования вариационного метода дана в [2.64]. Основанный на более современных данных анализ зависимости подвижности носителей заряда от концентрации легирующей примеси для объемного GaN со структурой вюрцита, выращенного MOCVD-методом, представлен в [2.64]. Рассматривались концентрации как доноров, так и акцепторов порядка 10^{17} см^{-3} . Специальная модель подвижности для объемного GaN, включающая зависимость подвижности от концентрации свободных электронов, приведена

Таблица 2.6. Диэлектрические постоянные III-N и других полупроводниковых материалов

| | GaN (Wz) | AlN (Wz) | InN (Wz) | GaN (Zb) | BN (c) | Si | Ссылки |
|---------------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-----------|------|--------------------|
| ϵ_r | 9,5 \pm 1, 10,4 | 8,5 | 15,3 | 9,5 | 7,1 | 11,9 | [2.3, 2.64, 2.492] |
| ϵ_r^{inf} | 5,5 | 4,77 | 8,4 | 5,35 | 4,5 | — | [2.3, 2.64, 2.492] |

в [2.308], однако более современные экспериментальные результаты требуют обновления данных о фактических параметрах.

Подвижность носителей заряда при слабых электрических полях

Несколько прогнозов и результатов измерений стали доступны для оценки максимальной подвижности при слабых полях как в объемных материалах, так и в двумерном электронном газе. В табл. 2.7 собраны данные о подвижности носителей заряда при электрических полях малой напряженности, соответственно в зависимости от температуры и примесей III-N в объемных материалах. Максимальные значения даны для совершенно некомпенсированного материала [2.64].

Последние достижения по выращиванию материалов показали значительное улучшение подвижности носителей заряда в каналах оптимизированных AlGaIn/GaN-материалов при изготовлении слоев каналов с двумерным элект-

Таблица 2.7. Сравнение значений подвижности при электрических полях слабой напряженности в различных объемных III-N- и 2DEG-материалах с двумерным электронным газом

| Материал | n/p | T_L (K) | N_D/N_A (cm^{-3}) | μ ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$) | Метод | Ссылки |
|-------------------|--------|--------------|-----------------------------------|--|--------|---------|
| GaN (<i>Wz</i>) | n | 300 | $N_D = 1 \times 10^{17}$ | 990 | МК | [2.113] |
| GaN (<i>Wz</i>) | n | 450 | $N_D = 1 \times 10^{17}$ | 391 | МК | [2.113] |
| GaN (<i>Wz</i>) | n | 600 | $N_D = 1 \times 10^{17}$ | 215 | МК | [2.113] |
| GaN (<i>Wz</i>) | p | 300 | $N_A = 3,6 \times 10^{16}$ | 150 | измер. | [2.123] |
| GaN (<i>Wz</i>) | n 2DEG | 300 | 0 | 2000 | МК | [2.337] |
| GaN (<i>Wz</i>) | n | 77 | $N_D = 1 \times 10^{16}$ | 6000 | VP | [2.64] |
| GaN (<i>Zb</i>) | n | 300 | $N_D = 1 \times 10^{17}$ | 1100 | МК | [2.17] |
| GaN (<i>Zb</i>) | n 2DEG | 300 | 0 | 2100 | МК | [2.337] |
| GaN (<i>Zb</i>) | p | 300 | $N_A = 1 \times 10^{13}$ | 350 | измер. | [2.21] |
| AlN (<i>Wz</i>) | n | 300 | $N_D = 1 \times 10^{17}$ | 135 | МК | [2.349] |
| AlN (<i>Wz</i>) | n | 77 | $N_D = 1 \times 10^{16}$ | 2000 | VP | [2.64] |
| AlN (<i>Zb</i>) | n | 300 | 0 | 200 | МК | [2.17] |
| AlN (<i>Zb</i>) | n | 100 | 0 | 400 | МК | [2.17] |
| InN (<i>Wz</i>) | n | 300 | $N_D = 1 \times 10^{17}$ | 3000 | МК | [2.35] |
| InN (<i>Wz</i>) | n | 300 | $N_D = 1,5 \times 10^{17}$ | 3570 | измер. | [2.114] |
| InN (<i>Wz</i>) | n | 77 | $N_D = 1 \times 10^{16}$ | 30000 | VP | [2.64] |
| InN (<i>Zb</i>) | n | 100 | $N_D = 1 \times 10^{17}$ | 9000 | МК | [2.17] |
| BN (<i>c</i>) | p | 300 | $N_A = 5 \times 10^{18}$ | 500 | измер. | [2.253] |

Wz — вюрцит, *Zb* — цинковая обманка, *c* — кубическая, *VP* — вариационный принцип, *МК* — метод Монте-Карло, *измер.* — измерения, T_L — температура решетки.

тронным газом с холловской подвижностью до $2000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ [2.435] при комнатной температуре в соответствии с теоретическими прогнозами [2.337]. Для анализа подвижности носителей заряда в объемном GaN и двумерном электронном газе в GaN температурные зависимости показаны на рис. 2.2, взятом из [2.37], и данных, представленных там же. Эффекты, которые могут повлиять на подвижность носителей заряда, включают:

- рассеяние на акустических и оптических фононах;
- рассеяние на ионизованных примесях: как на фоновых примесях, так и на поверхностных донорах;
- рассеяние на винтовых дислокациях [2.258, 2.329, 2.435];
- рассеяние на сплаве [2.34, 2.414].

Максимальная дрейфовая подвижность электронов в объемном GaN со структурой вюрцита составляет около $1100 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Подвижность дырок в объемном GaN намного меньше максимального значения $175 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Уменьшенное рассеяние на примесях в двумерном газе при очень низких уровнях поверхностного рассеяния приводит к значениям подвижности в двумерном электронном газе вплоть до $2000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ для материалов со структурой как вюрцита, так и цинковой обманки. Теория рассеяния на заряженных дислокациях в GaN дана в [2.258]. Данные о холловской подвижности в зависимости от температуры могут коррелировать с плотностью дислокаций, которые наблюдали ТЭМ-методом. Влияние винтовых дислокаций на подвижность но-

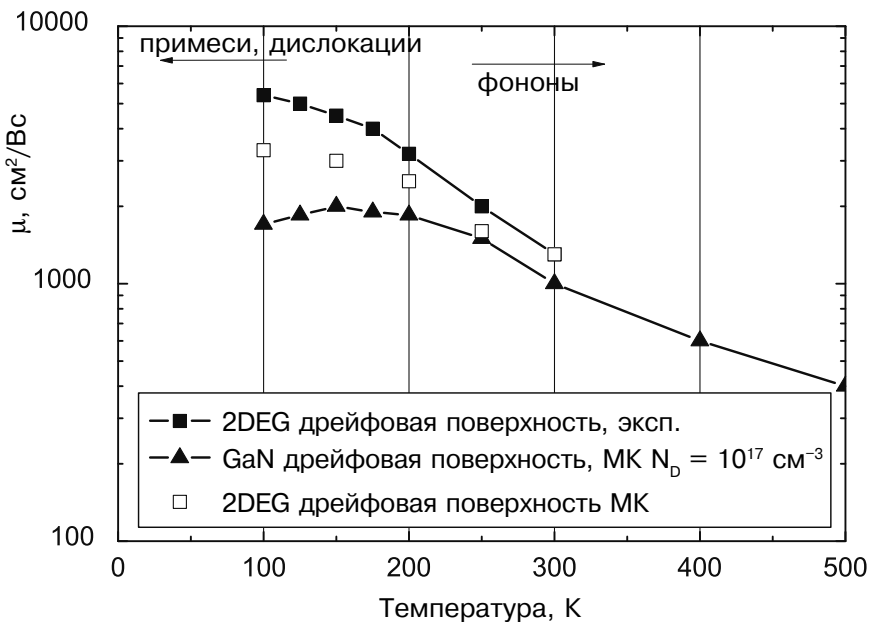


Рис. 2.2. Дрейфовая подвижность как функция температуры решетки T_L для объемного GaN и GaN с двумерным электронным газом с учетом ограничивающих эффектов по данным [2.37, 2.329]

сителей заряда в GaN в дальнейшем обсуждается в [2.493]. Модель объясняет влияние на подвижность носителей при различных уровнях легирования захвата носителей ловушками и соответствующего рассеяния. Разупорядочение структуры сплава является ограничивающим фактором при явлениях переноса на GaN-межфазной границе раздела; это обсуждалось в [2.414]. Дальнейший анализ проведен в главе 3. AlN является изолятором вследствие большой энергии активации доноров и большой ширины запрещенной зоны. Теория подвижности носителей заряда в электрических полях слабой напряженности в AlN обсуждается в [2.17]. Оказалось, что она ограничена фононным рассеянием до величин электронной подвижности, представленной в табл. 2.7. Было обнаружено, что теоретические значения дрейфовой подвижности составляют $135 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ и $200 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ для полностью некомпенсированного материала. Аналогично InN транспортные свойства дырок в AlN не очень хорошо понятны. Предсказанное значение дрейфовой подвижности в InN в полях слабой напряженности оказалось высоким и равным $3000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ по данным [2.35] и $3700 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ по данным [2.17]. При температуре 100 К максимальное значение подвижности в полях слабой напряженности высокое и составляет $9000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, как предсказано для InN со структурой цинковой обманки [2.17]. Расчеты на основе вариационного принципа ведут к предсказанным значениям $30000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при 77 К для полностью некомпенсированного материала при низкой концентрации примесей порядка 10^{16} см^{-3} . С другой стороны, перенос дырок в InN недостаточно хорошо понятен вследствие отсутствия собственного *p*-легирования [2.170].

Перенос зарядов в полях высокой напряженности

Имеются результаты нескольких расчетов характеристик по методу Монте-Карло, касающихся связи скоростей и напряженностей поля для GaN со структурой вюрцита для полей с высокой напряженностью; они даны в [2.37, 2.121]. Есть важное обсуждение времени задержки экстракции в гетероструктурных полевых транзисторах и результирующих значений скоростей носителей, которые не согласуются с расчетами по методу Монте-Карло (см. также раздел 2.2.7). В табл. 2.8 приведены скорости насыщения носителей при критических параметрах поля по данным разных источников.

Сравнение показывает, что для рассматриваемых материалов увеличивается как скорость насыщения $v_{\text{нас}}$, так и критическая напряженность электрического поля $E_{\text{крит}}$ по сравнению с другими материалами с высокой дрейфовой скоростью носителей, такими как кремний, GaAs и SiC. Максимальные величины скоростей высокие и составляют $3 \cdot 10^7 \text{ см/с}$, они были обнаружены для электронов в GaN. Отличия между полупроводниками со структурой вюрцита и цинковой обманкой оказались незначительными. Для AlN наблюдается очень высокое значение критической напряженности электрического поля в соответ-

ствии с большой энергией запрещенной зоны; величина критической напряженности электрического поля в InN меньше, чем в GaN. Предсказанное значение максимальной скорости электронов в InN достаточно высокое и составляет $4 \cdot 10^7$ см/с.

В отличие от объемных материалов, моделирование по методу Монте-Карло в каналах на основе AlGaIn/GaN с двумерным электронным газом, включающее эффекты горячих фононов и эффекты вырождения, проведенное в [2.380], было комбинированным: рассматривались методы Монте-Карло и анализ Шрёдингера — Пуассона. Были рассчитаны волновые функции для связанных электронов. Моделирование предполагает, что вырождение в двумерном электронном газе уменьшает дрейфовую скорость электронов, в то время как «горячие» фононы уменьшают дрейфовую скорость и увеличивают время релаксации энергии электронов. Время релаксации энергии при быстром температурном экстрагировании при комнатной температуре, рассчитанное по методу Монте-Карло, составляет 0,3 пикосекунды при 10 кВ/см [2.380]. Экспериментально определенное время энергии релаксации горячих электронов в n-GaN, выращенном методом молекулярно-лучевой эпитаксии, представлено в [2.521]. Величина времени экстракции достигла 0,2 пс при концентрации носителей 10^{18} см⁻³. Аналогичные

Таблица 2.8. Сравнение скоростей носителей заряда при критической напряженности электрического поля в различных объемных материалах

| Материал | n/p | T_L (К) | $E_{\text{крит.}}$ (кВ/см) | $v_{\text{пик.}}$ (10^7 см/с) | v (10^7 см/с) | N_D/N_A (см ⁻³) | Ссылки |
|-------------------|-----|--------------|-------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------|
| GaN (<i>Wz</i>) | n | 300 | 175 | 2,5 | — | $2 \cdot 10^{16}$ | [2.500] |
| GaN (<i>Wz</i>) | n | 300 | 150 | 2,7 | 2,5 | $1 \cdot 10^{16}$ | [2.37] |
| GaN (<i>Wz</i>) | n | 300 | 140 | 2,9 | 1,8 | $1 \cdot 10^{17}$ | [2.121] |
| GaN (<i>Wz</i>) | n | 77 | 150 | 3,2 | 2,7 | $1 \cdot 10^{16}$ | [2.37] |
| GaN (<i>Wz</i>) | p | 300 | — | — | 0,48 | — | [2.286] |
| GaN (<i>Zb</i>) | n | 300 | 145 | 2,6 | 1,34 | $1 \cdot 10^{17}$ | [2.17] |
| GaN (<i>Zb</i>) | p | 300 | — | — | 0,92 | — | [2.286] |
| AlN (<i>Wz</i>) | n | 300 | 450 | 1,7 | 1,4 | $1 \cdot 10^{17}$ | [2.121, 2.349] |
| AlN (<i>Wz</i>) | n | 300 | 447 | 2,3 | 2,16 | $1 \cdot 10^{17}$ | [2.113] |
| AlN (<i>Wz</i>) | p | 300 | — | — | — | — | — |
| AlN (<i>Zb</i>) | n | 300 | 550 | 1,8 | 1,59 | $1 \cdot 10^{17}$ | [2.17] |
| AlN (<i>Zb</i>) | p | 300 | — | — | — | — | — |
| InN (<i>Wz</i>) | n | 300 | 65 | 4,2 | 1,8 | $1 \cdot 10^{17}$ | [2.121] |
| InN (<i>Wz</i>) | n | 300 | 52 | 3,4 | — | $1 \cdot 10^{17}$ | [2.113] |
| InN (<i>Zb</i>) | n | 300 | 45 | 2,9 | 1,4 | $1 \cdot 10^{17}$ | [2.17] |
| InN (<i>Zb</i>) | p | 300 | — | — | — | — | — |

Wz — вюрцит, *Zb* — цинковая обманка, *c* — кубич.

исследования зависимостей свойств гетероструктур AlGaN/GaN, основанные на СВЧ-шумах, даны в [2.281]. Данные выходных значений энергии релаксации составили 0,3 пс при 10 кВ/см и 1 пс при 2 кВ/см. Переходный процесс переноса электронов, основанный на моделях по методу Монте-Карло в GaN, InN и AlN со структурой вюрцита, обсуждается в [2.121]. При рассмотрении переходного процесса обнаружены очень высокие теоретические значения выброса, следующего за фронтом импульса. Однако в статье также показан компромисс между переходным выбросом и скоростью насыщения при переносе заряда для приборов, аналогичных объемному полевому транзистору.

Зонная структура GaN

Зонная структура GaN проанализирована в ряде публикаций, например, в [2.108, 2.127, 2.128, 2.238, 2.522]. Однако, до сих пор не все понятно, особенно для зон с высокими энергиями. Современный обзор параметров зон GaN, AlN и InN со структурой вюрцита и цинковой обманки дан в [2.485], и большой обзор для III-V-материалов приведен в [2.486]. Последовательный набор параметров для III-N-материалов представлен как для вюрцита, так и для цинковой обманки. Экспериментально измерены и представлены: коэффициент поглощения, ширина запрещенной зоны, энергия связи экситона и времена рекомбинации носителей заряда в GaN со структурой вюрцита [2.317]. На основе этих значений могут быть определены как ширина запрещенной зоны и энергии экситона, так и радиационные постоянные.

В табл. 2.9 собраны доступные данные о параметрах масс на основе расчетных значений и измерений, касающихся зонной структуры. Существуют различные прогнозы, относящиеся к значениям величин эффективной массы электрона в GaN [2.128]. Эффективная масса электрона в зоне проводимости GaN со структурой вюрцита, найденная на основе измерений, составила $0,2 m_0$, как сообщается в [2.91]. В дальнейшем были собраны данные о параметрах масс, полученные на основе расчетов зонной структуры [2.127, 2.128, 2.238, 2.486]. Массы тяжелых дырок $m_{p,h}$ указаны вдоль x - и z -направлений. Эффективная масса дырок в p -GaN и влияние расщепления уровней и анизотропии зоны на статистику свободных дырок обсуждается для GaN-структуры вюрцита в [2.400]. Эффекты вырождения оказывают сильное влияние и требуют детальных исследований для получения эффективных масс дырок при определенной плотности состояний.

Энергии запрещенной зоны

Энергии запрещенных зон для различных кристаллических структур III-N-материалов сравниваются в табл. 2.10.

Далее для процессов переноса электронов и дырок в электрических полях большой напряженности практическое значение имеет междолинное распределение энергии в k -пространстве. Данные собраны в табл. 2.11 как для струк-

Таблица 2.9. Сравнение эффективных масс в различных III-N-полупроводниковых материалах при 300 К

| | m_n (m_e) | m_n ($\Gamma - K$) (m_e) | m_n ($\Gamma - A$) (m_e) | m_n ($\Gamma - M$) (m_e) | Ссылки |
|--------------------|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------|
| GaN (Wz) | 0,2 | 0,36 | 0,27 | 0,33 | [2.91] |
| AlN (Wz) | 0,48 | 0,42 | 0,33 | 0,40 | [2.349] |
| InN (Wz) | 0,11 (0,05) | — | — | — | [2.122, 2.486] |
| | m_n (Γ) (m_e) | $m_{n,l}$ (X) (m_e) | $m_{n,t}$ (X) (m_e) | Ссылки | |
| GaN (Zb) | 0,15 | 0,5 | 0,30 | [2.108, 2.485] | |
| AlN (Zb) | 0,25 | 0,53 | 0,31 | [2.108, 2.485] | |
| InN (Zb) | 0,07—0,11 | 0,48 | 0,27 | [2.485] | |
| | $m_{p,h}$ (m_e) | $m_{p,l}$ (m_e) | $m_{p,so}$ (m_e) | Ссылки | |
| GaN (Wz) | 1,4 | 0,3 | 0,6 | [2.108, 2.244] | |
| AlN (Wz) | 3,52 (z) | 3,53 (z) | 0,25 (z) | [2.108, 2.244] | |
| AlN (Wz) | 10,42 (x) | 0,24 (x) | 3,81 (x) | [2.108, 2.244] | |
| InN (Wz) | 1,63 | 0,27 | 0,65 | [2.108, 2.244] | |
| | $m_{p,h}$ (m_e) | $m_{p,l}$ (m_e) | $m_{p,so}$ (m_e) | Ссылки | |
| GaN (Zb) [100] | 0,74 | 0,21 | 0,33 | [2.108] | |
| GaN (Zb) [111] | 1,82 | 0,18 | 0,33 | [2.108] | |
| GaN (Zb) [110] | 1,51 | 0,19 | 0,33 | [2.108] | |
| AlN (Zb) [100] | 1,02 | 0,35 | 0,51 | [2.108] | |
| AlN (Zb) [111] | 2,85 | 0,30 | 0,51 | [2.108] | |
| AlN (Zb) [110] | 2,16 | 0,31 | 0,51 | [2.108] | |

тур вюрцита, так и для цинковой обманки. Неопределенность относительно структур зон и ширины запрещенной зоны существует для более высоких зон AlN и InN.

Данные о GaN и AlN со структурой вюрцита основаны на расчетах, проведенных в [2.441] с учетом опечаток, допущенных в [2.442]. На границах раздела между двумя полупроводниками разрыв энергии зоны проводимости и нахождение ширины запрещенной зоны весьма важны, так как они определяют энергетические барьеры, которые носителям заряда приходится преодолевать. Все III-N-материалы относятся к так называемым переходам I-типа. Однако в обычных гетероструктурах выравнивания симметричны согласно порядку роста, начиная с подложки. В сильно поляризованных полупроводниках, таких как системы материалов III-N, это не является необходимым, вследствие эффектов деформации, зависящих от подложки и результирующей деформации

и, таким образом, поляризационного заряда в тонком верхнем слое. Разрывы валентной зоны для GaN, AlN и InN изложены в [2.275]. Энергии выравнивания валентной зоны, обнаруженные для трех бинарных систем материалов, приведены в табл. 2.12. Далее также обсуждаются переходы к тройным системам. BN не включен в это рассмотрение, так как кубическая фаза BN не может быть выращена вследствие несоответствия со структурами других материалов.

Дальнейшие эмпирические расчеты псевдопотенциалов GaN и InN со структурой вюрцита даны в [2.522]. Для полностью известной зонной структуры нелокальный псевдопотенциальный расчет вюрцитной фазы материала системы III-N представлен в [2.128] для бинарных соединений, таких как GaN, AlN и InN. Расчеты зонной структуры GaN и AlN для решетки вюрцита даны в [2.298, 2.441]. В частности была получена выявленная структура валентной зоны и параметры эффективной массы для нитридов с решеткой типа вюрцита. Кубическое приближение оказалось вполне успешным для анализа структуры валентной зоны нитридов со структурой вюрцита.

В табл. 2.13 даны параметры прямой рекомбинации III-N-полупроводников с прямой зонной структурой. Как можно определить, прямая рекомбинация в GaN очень велика, и примерно на порядок величины больше, чем, например, в GaAs.

Зонная структура GaN, AlN и AlGaIn с решеткой типа цинковой обманки описана в [2.108]. В частности энергии долин $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ Γ , X и L рассчитаны как функции мольной фракции x .

Нитрид алюминия (AlN)

Второй после GaN, AlN — это самый важный бинарный материал в семействе III-N-материалов для применений в электронике, он чаще всего ис-

Таблица 2.10. Сравнение энергии запрещенных зон для различных объемных материалов при 300 К

| | | (Wz) | Ссылки | | | (Zb) | Ссылки |
|-----|------------------|----------------|----------------|----------------|---------------------|---------|--------|
| GaN | E_{g,Γ_1} | (эВ) 3,43 | [2.121] | $E_{g,\Gamma}$ | (эВ) 3,38, 3,1, 3,2 | [2.108] | |
| GaN | E_{g,Γ_3} | (эВ) 5,29 | [2.121] | $E_{g,X}$ | (эВ) 4.57, 4.7 | [2.108] | |
| GaN | $E_{g,L-M}$ | (эВ) 5,49 | [2.121] | $E_{g,L}$ | (эВ) 5.64, 6.2 | [2.108] | |
| AlN | E_{g,Γ_1} | (эВ) 6.2, 6.12 | [2.121, 2.245] | $E_{g,\Gamma}$ | (эВ) 5.94, 6.0 | [2.108] | |
| AlN | $E_{g,L-M}$ | (эВ) 6,9 | [2.121] | $E_{g,X}$ | (эВ) 5.1, 4.9 | [2.108] | |
| AlN | $E_{g,G-A}$ | (эВ) 7,2 | [2.121] | $E_{g,L}$ | (эВ) 9.42, 9.3 | [2.108] | |
| InN | E_{g,Γ_1} | (эВ) 0,77 | [2.501] | $E_{g,\Gamma}$ | (эВ) 0,75 | [2.486] | |
| InN | $E_{g,G-A}$ | (эВ) 4,09 | [2.121] | $E_{g,X}$ | (эВ) 2.486 | [2.486] | |
| InN | E_{g,Γ_3} | (эВ) 4,49 | [2.121] | $E_{g,L}$ | (эВ) 5.79 | [2.486] | |

Таблица 2.11. Сравнение междолинного интервала энергии в различных объемных материалах при 300 К

| | | (Wz) | Ссылки | | (Zb) | Ссылки |
|------------------|------|---------|----------------|-------|------|-------------------|
| GaN – | (эВ) | – | – | Г | (эВ) | – |
| GaN Г – 3 | (эВ) | 1,9 | [2.121] | Г – X | (эВ) | 1.4 [2.17, 2.244] |
| GaN L – M | (эВ) | 2,1 | [2.121] | Г – L | (эВ) | 1,6–1,9 [2.244] |
| AlN _Г | (эВ) | – | – | – | (эВ) | – |
| AlN Г – (L – M) | (эВ) | 0,7 | [2.121, 2.441] | – | (эВ) | – |
| AlN Г – K | (эВ) | 1.0 | [2.121, 2.441] | – | (эВ) | – |
| InN – | (эВ) | – | – | – | (эВ) | – |
| InN Г – (M – L) | (эВ) | 2,9–3,9 | [2.244] | – | (эВ) | – |
| InN Г – A | (эВ) | 0,7–2,7 | [2.244] | – | (эВ) | – |

пользуется в составе тройного соединения $Al_xGa_{1-x}N$, например в барьерах гетероструктур. По характеристикам он должен быть изолятором вследствие большой ширины запрещенной зоны и высокой энергии активации доноров. Рост бинарного AlN обычно происходит в виде зародышевого кристаллического слоя на полуизолирующем SiC или на сапфировой подложке, как указано, например, в [2.96], и в виде подслоя на границе раздела канал/барьер, см. [2.66].

Механические и оптические свойства

Основные свойства, такие как кристаллическая структура, механические свойства и термические свойства AlN, приведены в [2.287]. Плотность AlN намного меньше, чем для GaN или InN, как указано в табл. 2.1. Как показано в табл. 2.2 и в табл. 2.3, коэффициент термического расширения и твердость по Виккерсу AlN по величине близки к аналогичным значениям для GaN. Упру-

Таблица 2.12. Сравнение параметров согласования ширины запрещенной зоны (в эВ) для различных объемных материалов при 300 К

| Верх | Низ | GaN (Wz) | AlN (Wz) | InN (Wz) | Ссылки |
|------|------|-------------|-------------|-------------|---------|
| GaN | (Wz) | 0 | 0,7 | 1.05 | [2.275] |
| AlN | (Wz) | 0,7 | 0 | 1.81 | [2.275] |
| InN | (Wz) | 1,05 | 1,81 | 0 | [2.275] |
| Верх | Низ | GaN (Zb) | AlN (Zb) | InN (Zb) | Ссылки |
| GaN | (Zb) | 0 | 0,85 | 0,51 | [2.324] |
| AlN | (Zb) | 0,85 | 0 | 1.09 | [2.324] |
| InN | (Zb) | 0,51 | 1,09 | 0 | [2.324] |

Таблица 2.13. Сравнение параметров рекомбинации в различных объемных материалах при 300 К^{*)}

| | GaN | | AlN | | InN | |
|--------------------------|---------------------|---------|----------------------|---------|--------------------|---------|
| B (см ³ /с) | $1,1 \cdot 10^{-8}$ | [2.317] | $0,4 \cdot 10^{-10}$ | [2.489] | $2 \cdot 10^{-10}$ | [2.533] |

^{*)}Все данные приведены для структуры вюрцита.

гие константы AlN даны для фазы вюрцита в табл. 2.3 и для фазы цинковой обманки в табл. 2.4.

Теплопроводность в собственном AlN определена в [2.428]. Теплопроводность выше, чем у любого другого полупроводника, за исключением BN, SiC и алмаза, как это представлено в табл. 2.16. Это делает AlN потенциально привлекательным материалом для подложек. Оптические параметры, такие как показатель преломления n , для AlN приведены в [2.287]. Оптические параметры также собраны в [2.260], включая диэлектрические параметры и коэффициенты поглощения.

Основные свойства переноса зарядов

Хотя это и не проблема первостепенной важности, для большинства приборов, за исключением очень тонких слоев, близких к каналу, перенос зарядов в AlN относительно хорошо исследован методами моделирования Монте-Карло, так же как и понимание переноса заряда в структурах $Al_xGa_{1-x}N$ для различных составов материала, соответствующих разным значениям x . Ранняя подборка данных о переносе зарядов в $Al_xGa_{1-x}N$ и AlN представлена в [2.123]; показана низкая подвижность в AlN со структурой вюрцита как для p -, так и для n -легированного материала, как это представлено в табл. 2.8. Подвижность электронов в слабых электрических полях в AlN в соответствии с расчетами при комнатной температуре составляет $135 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при концентрации легирующей примеси 10^{17} см^{-3} .

Перенос зарядов в электрических полях большой напряженности

Дрейфовая скорость электронов в полях высокой напряженности в AlN со структурой вюрцита исследовалась путем моделирования методом Монте-Карло [2.349]. Развитие моделирования по методу Монте-Карло для переноса заряда в AlN представлено в [2.121]. Были найдены следующие характеристики: относительно большая эффективная масса электрона $0,48 m_e$, широкая запрещенная зона $\approx 6,2 \text{ эВ}$ и очень слабое разделение подуровней. Было найдено высокое значение критической напряженности электрического поля 450 кВ/см [2.349], как показано в табл. 2.7. Скорость насыщения дрейфовой скорости в AlN достигает величины $1,4 \cdot 10^7 \text{ см/с}$ при комнатной температуре, в то время как пиковая (максимальная) скорость в объемном материале по расчетам равна $1,7 \cdot 10^7 \text{ см/с}$ при концентрации легирующей примеси $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Зонная структура AlN

Большая энергия, соответствующая большой ширине запрещенной зоны AlN, равной 6,2 эВ при комнатной температуре, позволяет изменять ширину запрещенной зоны структуры $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ в широком диапазоне значений от величины, соответствующей GaN, до величины, которая существует для AlN. Что касается ширины запрещенной зоны InN, то она оказалась даже меньше, чем у GaN; более широкий диапазон доступен для материала $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$. Ранние расчеты зонной структуры AlN для решеток типа вюрцита и цинковой обманки собраны в [2.236]. Зонная структура AlN с решеткой типа вюрцита рассчитана в [2.128]. Электронные свойства уровней зонной структуры AlN с решеткой типа цинковой обманки в дальнейшем рассчитывались методом эмпирических псевдопотенциалов в [2.108]. На основе этих расчетов могут быть получены параметры эффективной массы электронов и дырок, как представлено в табл. 2.9. Параметры прямой рекомбинации даны в табл. 2.13, взяты они из [2.489] и были использованы для разработки светодиодов с очень большой шириной запрещенной зоны и соответствующей энергией фотонов.

Нитрид индия (InN)

InN и его соединения $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ и $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ не очень широко применяются в электронных приборах [2.230]. Используются материалы InAlN/GaN [2.143], а также AlGaIn/InGaIn [2.425], как сообщается в публикациях о гетероструктурах. Содержание индия в структурах мало, см., например, [2.85, 2.150], что необходимо для согласования с параметрами решетки буферных слоев GaN. Выращивать InN методом MOCVD сложно из-за более высокой температуры процесса выращивания и результирующего фона концентрации дефектов, а также большого количества остаточных вакансий азота вследствие более высокой температуры процесса выращивания по сравнению с методом МЛЭ, как поясняется в главе 3. Процесс выращивания InN методом МЛЭ находится в стадии разработки и позволяет улучшить качество материала и, таким образом, использовать весь диапазон состава такого материала как $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Высококачественный InN недавно получен МЛЭ-методом, см., например, [2.114, 2.501]. Полный обзор эпитаксиального выращивания дан в [2.38]. Было получено значение подвижности электронов в объемном материале $3570 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Недавно появилось сообщение о InN *p*-типа [2.170], который является основой реализации биполярных или оптоэлектронных *p-n*-приборов.

Механические и оптические свойства

Первая подборка данных о механических, оптических и термических свойствах InN приведена в [2.449, 2.451]. Данные о механических свойствах приведены в табл. 2.1 и табл. 2.2; однако данные не окончательные из-за отсут-

ствия при исследованиях достаточных количеств объемного материала InN [2.449]. Постоянные упругости представлены в табл. 2.3. Коэффициенты термического расширения для структур как вюрцита, так и цинковой обманки приведены в табл. 2.5. Значение коэффициента термического расширения и постоянные решетки кристалла получены в предположении выращивания рассматриваемого материала на сапфировых подложках [2.54]. Величины теплопроводности и теплоемкости для InN первоначально были основаны на оценках и экстраполяциях, как это объясняется в [2.449], см. также табл. 2.16. Оптические параметры InN представлены в [2.299]. Сделаны новые предположения о ширине запрещенной зоны и оптических параметрах InN, опубликованных на основе новых исследований образцов с улучшенным качеством [2.278, 2.279, 2.425]. Этот факт также наносит сильный удар по ранее проведенным расчетам процессов переноса заряда и зонной структуры, о которых еще не все известно.

Основные свойства переноса носителей заряда

Ранний расчет транспортных свойств в InN приведен в [2.54, 2.453]. Эти данные соответствуют высокой концентрации носителей заряда 10^{19} – 10^{20} см⁻³ и малой подвижности. Ранняя оценка подвижности носителей заряда в InN как функции температуры и степени компенсации на основе использования расчетов по вариационному принципу дана в [2.64]. Теоретические расчеты давали очень высокие значения величины подвижности 4400 см²/В·с, однако такая подвижность не была экспериментально достигнута. При проведении экспериментов на границе раздела InN/AlN были получены значения подвижности электронов 1200 см²/В·с при концентрации носителей в слое $1,2 \cdot 10^{14}$ см⁻², как сообщается в [2.307]. Поляризационные процессы в гетероструктурных полевых транзисторах на основе *n*-InAlN/GaN-структур и их влияние на работу в режиме постоянного и ВЧ-напряжения описаны в [2.186, 2.187].

Использование In_xAl_{1-x}N/GaN является критичным, так как наведенный поляризационный заряд намного сильнее зависит от состава материала *x*, чем в системе AlGaN/GaN, как это было выяснено позднее. В [2.450] были продемонстрированы гетероструктурные полевые транзисторы с *p*-каналом из In_xGa_{1-x}N, основанные на поляризационном легировании. На основе измерения холловской подвижности были зафиксированы значения подвижности двумерного дырочного газа, приблизительно равные 700 см²/В·с при низкой температуре решетки, равной 66 К.

Явления переноса носителей заряда в электрических полях большой напряженности

Чаще всего смоделированные результаты по переносу носителей заряда в InN основаны на предположении о прямой зонной структуре с шириной запрещенной зоны в InN, равной 1,89 эВ. Это значение недавно было скорректировано

к значительно меньшей величине ширины s запрещенной зоны $\approx 0,77$ эВ при комнатной температуре [2.501]. Большинство моделей с использованием метода Монте-Карло должны рассматриваться для структур с ячейкой каменной соли. Перенос электронов в InN со структурой вюрцита был рассчитан Лири (Leary) в работе [2.348]. Дальнейшая группа вычислений по методу Монте-Карло на основе вюрцита, выполненных Белотти (Bellotti) и соавторами, представлена в работе [2.35]. Энергия междолинного интервала энергий приведена в табл. 2.11.

Как указано в табл. 2.8, характеристики зависимостей скорости от напряженности электрического поля дают максимальное значение скорости носителей заряда $4,2 \cdot 10^7$ см/с при критической напряженности электрического поля около 52—65 кВ/см в случае гомогенного объемного материала [2.113, 2.121]. Эти предсказанные свойства по сравнению с материалами GaAs или InGaAs не удивительны при учете малой эффективной массы, малой ширины запрещенной зоны и максимальной скорости электронов. Расчеты свойств переноса в InN дали значения скорости более 10^8 см/с [2.121]. Совершенно выдающиеся результаты по расчету теоретических значений частот среза HFET выведены с помощью этих моделей как верхние границы для теоретического представления о работе структур InN-FET.

Зонная структура

Данные о зонной структуре InN взяты в частности из расчетов, представленных в работе [2.128], в которой до сих пор не приняты во внимание последние модификации значений ширины запрещенной зоны InN. Больше экспериментальных данных об электронной структуре InN, выращенного методом MBE, приведено в работе [2.307]. Значение эффективной массы электрона для InN оказалось равным $0,11m_e$ [2.486], как представлено в табл. 2.9. Эта величина эффективной массы должна рассматриваться как хорошее согласование с шириной запрещенной зоны 0,77 эВ, когда мы проводим сравнение с другими полупроводниками, такими как InAs или InP. Первые значения оптической ширины запрещенной зоны InN были опубликованы Тансли (Tansley) в работе [2.450]. Это привело к значению 1,89 эВ при комнатной температуре. Более поздние статьи об оптических свойствах InN разрешают противоречия нескольких публикаций о результатах измерений для материалов, выращенных различными методами и по-разному легированных; они указаны в работах [2.278, 2.279]. Как было обнаружено, ширина запрещенной зоны InN составляет 0,77 эВ при комнатной температуре [2.425], как это представлено в табл. 2.10. Различия объясняют существованием оксинитридов, у которых ширина запрещенной зоны намного больше. Такое малое значение ширины запрещенной зоны означает, что это III-V-материал для электроники с соответствующей ожидаемой величиной пробивного напряжения приборов.

С точки зрения оптики это означает, что в системах III-N становятся доступны излучения с длиной волны в очень широком диапазоне от глубокого ультрафиолета до красного. Междолинные интервалы энергии как для вюрцита, так и для цинковой обманки представлены в табл. 2.11, где используется предположение о значении ширины запрещенной зоны 1,89 эВ. Тем не менее, там мало текущей информации о междолинных интервалах энергии InN со структурой цинковой обманки (Zb).

Нитрид бора (BN)

Нитрид бора был обнаружен в нескольких кристаллографических формах. Самые важные изолирующие или полупроводниковые формы BN — это материалы с кубической решеткой, которые метастабильны при нормальных условиях [2.53, 2.99, 2.253]. Керамический BN широко применяется для производства промышленных инструментов как абразивный материал. Большое преимущество BN с кубической структурой — его большая твердость по Виккерсу (Vickers) [2.253] и его хорошая теплопроводность, как это представлено в табл. 2.16. Даже *pn*-диоды (фотодиоды) для диапазона ультрафиолетового излучения могут быть изготовлены из кубического *c*-BN, как сообщается в [2.300]. Несмотря на проблемы с выращиванием, светоизлучающие диоды (LED) для ультрафиолетового диапазона излучения могут быть изготовлены [2.491]. Они позволяют работать при очень высоких температурах вплоть до 530 °С.

Механические и оптические свойства

Плотность кубического *c*-BN приведена в работе [2.99], а также представлена в табл. 2.1. Выдающуюся твердость BN по Виккерсу можно наблюдать в табл. 2.2 [2.99]. Постоянные упругости кубического BN представлены в табл. 2.3. Коэффициенты термического расширения для кубического BN даны в табл. 2.5. Значения для кубической фазы очень близки к значениям GaN со структурой цинковой обманки. Измерения теплопроводности и теплоемкости кубического BN будут приведены в табл. 2.16. Теплопроводность BN достигает величины 750 Вт/К·м, и это значительно выше, чем для многих других полупроводников. Теоретический предел оценен равным 1300 Вт/К·м.

Основные транспортные свойства носителей заряда

Оценка подвижности носителей заряда в кубическом BN в зависимости от концентрации носителей заряда представлена, например, в [2.253]. Кубический BN обычно легирован [2.135]. Холловская подвижность электронов составила 500 см²/Вс при их концентрации $5 \cdot 10^{18}$ см⁻³ [2.253]. Для материала *n*-типа существует очень мало экспериментальных данных, например [2.300, 2.496]. Когда кубический *c*-BN представляет собой изолятор [2.496], перенос характеризуется высокой энергией активации для носителей заряда $\geq 0,2$ эВ.

Транспортные свойства при сильных электрических полях

Расчеты зонной структуры даны в работе [2.71] вместе с результатом о том, что кубический BN представляет собой изолятор с шириной запрещенной зоны 7,1 эВ. Таким образом, нет доступных расчетов транспортных свойств по методу Монте-Карло для с-BN.

Поля диэлектрического пробоя

В табл. 2.14 представлены измеренные значения напряженностей электрических полей, при которых происходил пробой различных III-N-объемных материалов. Опубликованное значение напряженности электрического поля пробоя для GaN составляет около 3 МВ/см. У AlN величина напряженности электрического поля пробоя намного выше из-за более широкой ширины запрещенной зоны, которая может даже превышать величину, представленную в табл. 2.14 [2.388]. Напряженность поля пробоя диэлектрического InN недостаточно исследована. Последнее является следствием высокой концентрации ловушек N_T и новых исследований фундаментальной зонной структуры. Значения напряженностей электрического поля пробоя для объемного кубического с-BN, опубликованные в [2.53], изменяются от 2 до 6 МВсм⁻¹.

Зонная структура BN

Расчеты зонной структуры кубического BN представлены в работе [2.496]. Аналогичные расчеты, но не для кубической фазы BN представлены в [2.237]. Величина ширины запрещенной зоны кубического BN оказалась аналогичной значению для AlN и составила $E_g \approx 6,4$ эВ при комнатной температуре [2.253]. Дальнейшие расчеты для кубического BN с помощью формального метода локальной плотности псевдопотенциала представлены в работе [2.497]. Расчетные плотности заряда BN очень похожи на значения, полученные для других III-V-полупроводников. Анализ дефектов атомов Be, Mg и Si в решетке кубического BN представлен в работах [2.135, 2.448]. Замещение атомов B атомами Mg или Be обычно приводит к поведению выращиваемого материала как материала *p*-типа.

2.1.2. Ограничения материалов

Свойства III-N-материалов, касающиеся переноса заряда и ограничения свойств в этих материалах, обсуждались выше. Дальнейшие результаты рассматриваются в следующих параграфах.

Рекомбинация, генерация и пробой

Процессы рекомбинации и генерации имеют фундаментальную важность для оптоэлектронных и биполярных электронных приборов. Однако вследствие влияния процессов захвата электронов ловушками в приборах типа FET, эти эффекты также критически определяют совершенство приборов. Для эффек-

Таблица 2.14. Сравнение значений напряженности электрического поля пробоя объемных материалов при 300 К

| | GaN (Wz) | Ссыл- ка | AlN (Wz) | Ссыл ка | InN (Wz) | Ссыл- ка | BN (с) | Ссыл- ка |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-----------|-------------|
| $E_{\text{пробоя}}$ (МВ/см) | 3,3 | [2.61] | 8,4 | [2.388] | 1,2 | [2.244] | 2—6 | [2.253] |

тов, связанных с полями большой напряженности при увеличивающихся движущих силах, экспериментальная оценка процессов ударной ионизации в GaN обсуждалась в [2.229]. Параметры процесса ударной ионизации получены из информации о приборе HFET на основе структуры AlGaIn/GaN с длиной затвора 0,9 мкм. Для диапазона напряженностей сильных электрических полей $\geq 10^6$ В/см данные могут соответствовать классическим соотношениям:

$$\alpha_n = A \cdot \exp(-K / E), \quad (2.1)$$

$$\alpha_n = 2.9 \cdot 10^8 \exp(-3.4 \cdot 10^7 / E). \quad (2.2)$$

Для полей с меньшей напряженностью эти выражения нуждаются в модификации, т. к. влияние поля слабее вследствие снижения числа реальных носителей заряда. Соотношения в выражениях (2.1) и (2.2) предполагают, что критическая напряженность электрического поля в 8 раз больше, по сравнению с данными для GaAs, полученными при аналогичных процессах выведения. Расчеты по методу Монте-Карло процессов ионизации электронным ударом в GaN как со структурой цинковой обманки, так и вюрцита представлены в [2.212]. В условиях, когда можно сравнивать напряженности электрических полей, электроны «холоднее» в структуре вюрцита, таким образом, скорости ионизации ниже, чем в фазе электронного удара в GaN со структурой Zb, что можно найти в [2.340]. Моделирование предполагает очень небольшое значение порога для пробоя аналогично измерениям в приборе, что представлено в [2.229]. Моделирование на основе метода Монте-Карло процессов ионизации дырками в обеих фазах GaN обсуждается в [2.339]. Критическое значение напряженности электрического поля для процессов ионизации дырками в Zb-GaN оказалось аналогичным для такого же процесса ионизации электронами и соответствует 3 МВ/см. Для структуры вюрцита пробой аналогичен процессу в электрических полях большей напряженности, тогда как при более низких полях влияние процессов, осуществляемых дырками при ударной ионизации, оказалось преобладающим.

Процессы ионизации электронным ударом в $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ оценивались с помощью моделирования методом Монте-Карло во всем диапазоне составов материала [2.56]. Результаты сведены к простому выражению, как дано в соотно-

шении (2.1). Как ожидалось, напряженность критического поля повышаются с увеличением в материале составляющей части с большей шириной запрещенной зоны. Вообще для $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ наблюдаются очень низкие скорости ионизации. Исследования ВЧ-пробоя в объемном GaN и приборах MESFET на основе GaN представлены в [2.112]. Обнаружено, что напряжение ВЧ-пробоя возрастает с увеличением частоты применяемого для возбуждения ВЧ-сигнала большой мощности. Разница объясняется откликом во времени энергии частиц. Критическое значение напряженности электрического поля для ударной ионизации в HFET на основе AlGaIn/GaN оказалось около 3 МВ/см при комнатной температуре, как сообщается в [2.95]. Это согласуется со значениями напряженности поля пробоя в объемном GaN. Значения напряженности электрического поля и соответствующих свойств материалов снова представлены для сравнения в табл. 2.15 для различных гомогенных материалов. Вообще наблюдается увеличение критической напряженности электрического поля с увеличением ширины запрещенной зоны. Широкозонные материалы обладают значениями пробивной напряженности электрического поля, на порядок величины большей, чем для обычных полупроводников. Материалы подложек SiC и алмаза обладают значениями напряженности электрического поля пробоя, аналогичной такой же для III-N-полупроводников.

2.1.3. Термические свойства и ограничения

В дополнение к своим электрическим ограничениям приборы на основе III-N-полупроводников являются объектами сильного термического самонагрева. В табл.2.16 представлены термические свойства нескольких бинарных полупроводниковых материалов. Температурная зависимость теплопроводности была смоделирована соотношением:

$$K_L(T_L) = K_{300K} \cdot \left(\frac{T_L}{300K} \right)^\alpha, \quad (2.3)$$

что также рассмотрено в главе 8.

Теплопроводность и теплоемкость

При рассмотрении этих параметров можно сравнить их с параметрами кремния. Теплопроводность кремния больше, чем у GaAs. В противоположность этому теплопроводность GaN аналогична значению для кремния. Теплопроводность k_{300} AlN при 300 К лучше, чем k_{300} GaN, в то время как InN обладает очень низкой величиной теплопроводности [2.223]. Для BN наблюдается самое высокое значение теплопроводности по сравнению со всеми III-N-материалами. Впервые данные о термических свойствах GaN были приведены в [2.423]. Результаты дальнейших исследований термических свойств

Таблица 2.15. Пробивные поля, энергии запрещенных зон и диэлектрические константы для различных полупроводниковых материалов

| Материал | Поле пробоя (МВ/см) | E_g (эВ) | ϵ_r (-) | Ссылки |
|----------|------------------------|---------------|---------------------|----------------|
| Si | 0,3 | 1,12 | 11,9 | [2.463] |
| GaAs | 0,4 | 1,43 | 12,5 | [2.463] |
| InP | 0,45 | 1,34 | 12,4 | [2.463] |
| GaN (Wz) | 3,3 | 3,43 | 9,5 | [2.463] |
| AlN (Wz) | 8,4 | 6,2 | 8,5 | [2.388, 2.463] |
| InN (Wz) | 1,2 | 0,7 | 15,3 | [2.244, 2.451] |
| BN (с) | 2—6 | 6,4 | 7,1 | [2.253] |
| 4Н—SiC | 3,5 | 3,2 | 10 | [2.463] |
| 6Н—SiC | 3,8 | 2,86 | 10 | [2.463] |
| Алмаз | 5 | 5,6 | 5,5 | [2.463] |

представлены в [2.4]. Значение теплопроводности для AlN определено в [2.428]. Теплопроводность GaN часто определяют по работе Сихеля (Sichel) [2.423]. Однако некоторые исследователи уделяют особое внимание влиянию дислокаций на теплопроводность. Хороший обзор данных и методов измерений представлен в [2.120]. Экспериментальное исследование влияния дислокаций на теплопроводность в GaN представлено в [2.264]. Измерения указывают на сильное увеличение теплопроводности при уменьшении плотности дислокаций до 10^8 см^{-2} , особенно при температурах ниже 200 К. Теоретические предсказания, полученные в работе [2.216], оценивают максимальное значение для теплопроводности в GaN около $200 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}$. Экспериментальные значения теплопроводности InN ($\leq 45 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}$) намного меньше, чем теоретически предсказанные $176 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}$ [2.223].

Данные о теплоемкости также приведены в табл. 2.16. Значения теплоемкости приведены для постоянного давления. Для SiC измеренные значения для поли типа 6Н—SiC используются в общем случае для всех модификаций SiC [2.356]. Теплоемкость бинарных полупроводников меньше, чем у материала подложки. Более подробный анализ материалов, применяющихся для корпусирования, и динамических откликов приведен в главе 8.

2.1.4. Тройные и четверные III-N-материалы

Существование тройных и даже четверных материалов в III-N-системе — это фундаментальное преимущество относительно других широкозонных полупроводниковых материалов, таких как SiC. Возможность выращивания $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ и $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ в структурных бинарных соединениях III-N по-

Таблица 2.16. Термические свойства III-N двойных и тройных материалов при 300 К

| | k_{300} (Вт/К м) | α (—) | c_{300} (Дж/К кг) | Ссылки |
|--------------|-----------------------|-----------------|------------------------|-----------------------|
| Si | 148 | -1,35 | 711 | [2.406] |
| GaAs | 54 | -1,25 | 322 | [2.356] |
| InP | 68 | -1,4 | 410 | [2.356] |
| GaN (Wz) | 130 | -0,43 | 491 | [2.120, 2.423] |
| AlN (Wz) | 285 | -1,57 | 748 | [2.428] |
| InN (Wz) | 38,5, 45, 80, 176 | — | 325 | [2.223, 2.428, 2.449] |
| BN (с) | 749 | — | 600 | [2.99] |
| 6H—SiC | 390 | -1,5 | 715 | [2.57] |
| 6H—SiC | 490 | — | 690 | [2.244, 2.331] |
| 4H—SiC | 330 | — | 690 | [2.244, 2.416] |
| V-легир. SiC | 370 | — | 690 | — |
| Сапфир | 42 | — | 750 | — |
| Алмаз | 2,000—2,500 | -1,85 | 520 | [2.405] |

зволяет конструировать необходимую зонную структуру. Это имеет очень большое значение для применения этих материалов в электронике и оптоэлектронике. Количественные параметры (P) материалов объединены квадратичными интерполяциями следующих двух подходов:

$$P_{AxBI-xN} = P_A \cdot x + P_B (1 - x) + C_{P,AB} x (1 - x). \quad (2.4)$$

Во втором подходе соотношение (2.4) можно записать другим способом, а именно:

$$P_{AxBI-xN} = a + b \cdot x + c \cdot x^2. \quad (2.5)$$

Это приводит к различным коэффициентам, которые могут быть непосредственно скоррелированы с составом и свойствами бинарных материалов. Иногда (2.5) расширяют до полиномиального выражения третьего порядка:

$$P_{AxBI-xN} = a + b \cdot x + c \cdot x^2 + d \cdot x^3. \quad (2.6)$$

Все количественные параметры будут проанализированы в соответствующих секциях с применением вышеупомянутых формул в квадратичной интерполяции. При необходимости будут упомянуты кубическая или другие схемы интерполяции.

Нитрид алюминия галлия ($Al_xGa_{1-x}N$)

$Al_xGa_{1-x}N$ — это самое важное тройное соединение, так как различием в параметрах кристаллической решетки относительно GaN можно эффективно управлять почти для всех составов. Может быть, потребуется разграничить AlGaN со структурами вюрцита и цинковой обманки, так как материал со структурой цинковой обманки обладает свойством перехода от прямой к непрямой зонной структуре полупроводника [2.235].

Механические и оптические свойства

Что касается плотности, твердости по Виккерсу и диэлектрических постоянных, то обычно не применяют каких-то специальных способов, и указанные значения можно интерполировать линейно с большой точностью между значениями для бинарных соединений GaN и AlN. Значения теплоемкости для тройных соединений можно интерполировать линейно, как это дано в выражении (2.7):

$$c_{L,AB} = (1-x)c_{L,A} + x \cdot c_{L,B}. \quad (2.7)$$

Значения теплопроводности $Al_xGa_{1-x}N$ можно интерполировать с помощью указанного ниже выражения (2.8), взятого из работы [2.357]. Данные о теплопроводности $Al_xGa_{1-x}N$ приведены в [2.255]. Выведенные параметры даны в табл. 2.17.

$$k_{AB} = \left(\frac{(1-x)}{k_A} + \frac{x}{k_B} + \frac{x \cdot (1-x)}{Ck_{AB}} \right)^{-1}. \quad (2.9)$$

Аналогично температурную зависимость α_{AB} интерполируют линейно:

$$\alpha_{AB} = (1-x) \cdot \alpha_A + x \cdot \alpha_B. \quad (2.9)$$

Для всех тройных III-V-полупроводников обнаружена сильная зависимость теплопроводности от состава [2.356]. Значение теплопроводности 25 Вт/м·К обнаружено для $Al_{0,4}Ga_{0,6}N$ [2.255].

Основные транспортные свойства носителей зарядов

Оценка зависимости транспортных свойств носителей заряда от температуры полупроводниковых соединений $Al_xGa_{1-x}N$ и $In_xGa_{1-x}N$ со структурой цинковой обманки с применением моделирования по методу Монте-Карло приведена в [2.17]. Данные для соотношения (2.6) представлены в табл. 2.18. В таблице дана интерполяция подвижности в полях слабой напряженности в соответствии с гармоническим значением:

$$\frac{1}{\mu_{AB}} = \frac{x}{\mu_A} + \frac{1-x}{\mu_B} + \frac{x \cdot (1-x)}{C_{\mu,AB}}. \quad (2.10)$$

Совокупность данных о значениях подвижности носителей заряда в $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ и $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ все еще относительно мала. Тем не менее предварительные значения, полученные на основе проведенных исследований, представлены в [2.65]. Потенциал рассеяния на сплаве оказался важным для определения дрейфовой подвижности, как в $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, так и в $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ при комнатной температуре и при 77 К [2.65]. Рассеяние на сплаве представляется сравнительно менее важным для $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ [2.65]. Однако значение подвижности для $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ в [2.113] показывает также сильную зависимость от состава материала. Это подтверждается численными исследованиями рассеяния в AlGaN и InGaN [2.34].

Значения дрейфовой подвижности приведены в табл. 2.18.

Транспортные процессы в электрических полях большой напряженности

В табл. 2.19 представлены значения скорости насыщения (saturation velocity), которая рассчитана как в соответствии с полиномиальным подходом (2.6), так и квадратичным методом, как это дано в (2.14).

Как можно обнаружить в [2.17], критическая величина напряженности электрического поля и максимальные (пиковые) значения скоростей обычно не являются линейными функциями от состава материала для $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ или $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ между бинарными составляющими. Снова был использован полиномиальный подход, результаты представлены в табл. 2.19. В другом случае может быть использован квадратичный подход:

$$v_{\text{sat},AB} = (1-x)v_{\text{sat},A} + xv_{\text{sat},B} + x(1-x)C_{v_{\text{sat}},AB}, \quad (2.11)$$

$$v_{\text{peak},AB} = (1-x) \cdot v_{\text{peak},A} + x \cdot v_{\text{peak},B} + x \cdot (1-x) \cdot C_{v_{\text{peak}},AB}, \quad (2.12)$$

$$E_{\text{crit},AB} = (1-x)E_{\text{crit},A} + xE_{\text{crit},B} + x(1-x)C_{E_{\text{crit}},AB}. \quad (2.13)$$

Параметры приведены также в табл. 2.19. Значения скоростей носителей заряда в бинарных соединениях также приведены выше в табл. 2.8, а критические

Таблица 2.17. Интерполяция теплопроводности k в III-N тройных материалах

| | $C_{k,AB}$ (Вт/м К) | Ссылки |
|--------------------------------------|------------------------|---------|
| $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ | 6,95 | [2.255] |
| $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ | 1,4 | [2.356] |
| $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ | 3,3 | [2.356] |

Таблица 2.18. Интерполяция подвижности μ в III-N тройных соединениях для различных моделей при комнатной температуре

| $\mu(x)$ | | a ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{c}$) | b ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{c}$) | c ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{c}$) | d ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{c}$) | N_D (cm^{-3}) | Ссылки |
|--------------------------------------|------|--|--|--|--|-------------------------------|--------|
| $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ | (Zb) | 1,157 | -1, 329 | -283 | 671 | 10^{17} | [2.17] |
| $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ | (Zb) | 465 | 755 | -61 | 676 | 10^{17} | [2.17] |

| $\mu(x)$ | | $C\mu, n_{AB}$ ($\text{cm}^2/(\text{Vc})$) | $C\mu, p_{AB}$ ($\text{cm}^2/(\text{Vc})$) | Ссылки |
|--------------------------------------|------|---|---|----------------|
| $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ | (Wz) | 40 | 1e6 | [2.113, 2.356] |
| $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ | (Wz) | 97 | 1e6 | [2.65] |
| $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ | (Wz) | 1e6 | 1e6 | [2.65, 2.452] |

Wz — вюрцит, Zb — цинк. обманка.

значения напряженностей электрического поля E_{crit} представлены в табл. 2.19 на основе данных табл. 2.8.

Зонная структура

Свойства зонной структуры тройного сплава $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ приведены в работах [2.127, 2.235]. Значения эффективных масс m_v и ширины запрещенной зоны E_g описываются квадратичной интерполяцией:

$$m_{v,AB} = (1-x)m_{v,A} + x m_{v,B} + x(1-x)C_{mv,AB}, \quad (2.14)$$

$$E_{g,AB} = (1-x)E_{g,A} + xE_{g,B} + x(1-x)C_{Eg,AB}. \quad (2.15)$$

Зависимости фундаментальной ширины запрещенной зоны $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ от состава материала сплава и от давления обсуждаются в [2.410]. Относительно сильная взаимосвязь наблюдается для $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Параметры зависимости представлены в табл. 2.21. Дальнейшая информация о зависимости ширины запрещенной зоны от состава материала $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ для ($0 \leq x \leq 1$) основана на показаниях фотодетекторов, работающих в ультрафиолетовом диапазоне длин волн и выращенных на сапфире, она представлена в [2.489]. Параметры взаимосвязи эффективных масс и ширины запрещенной зоны даны в табл. 2.20 и 2.21. Как можно видеть, взаимосвязь по большей части незначительная. Структуры зон, рассчитанных методом нелокальных псевдопотенциалов III-N-материалов в фазе вюрцита тройных сплавов $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ и $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$, даны в работе [2.127]. Данные включают систематизированную подборку параметров, связанных с эффективной массой в минимуме зоны проводимости. Интерполяции энергий ширины запрещенной зоны даны в табл. 2.21. Включены последние данные для InN. Необходимо разграничивать взаимосвязи параметров в структуре цинковой обманки, так как имеют

Таблица 2.19. Интерполяция скорости насыщения v_{sat} , пиковой скорости v_{peak} и E_{crit} в III-N тройных соединениях

| v_{sat} | a (10^7 см/с) | b (10^7 см/с) | c (10^7 см/с) | N_{D} (см^{-3}) | Ссылки |
|--------------------------------------|--|---|--|--|---------------|
| $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ | 1,3425 | 0,574 | -0,3215 | 10^{17} | [2.17] |
| $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ | 1,3286 | 0,3657 | -0,2857 | 10^{17} | [2.17] |
| | $C_{\text{psat,AB}}$ (10^7 см/с) | $C_{\text{vpeak,AB}}$ (10^7 см/с) | $C_{\text{Ecrit,AB}}$ (кВ/см) | N_{D} (см^{-3}) | Ссылки |
| $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ | -3,85 | -0,1 | 50 | 10^{17} | [2.17, 2.356] |
| $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ | 0,35 | -1 | -25 | 10^{17} | [2.17] |
| $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ | — | — | — | — | — |
| | | E_{crit} (кВ/см) | N_{D} (см^{-3}) | Ссылки | |
| GaN | (Wz) | 225 | $2 \cdot 10^{16}$ | [2.211, 2.500] | |
| GaN | (Wz) | 140 | 10^{17} | [2.121] | |
| AlN | (Wz) | 450 | 10^{17} | [2.121] | |
| InN | (Wz) | 65 | 10^{17} | [2.121] | |
| GaN | (Zb) | 150 | 10^{17} | [2.17] | |
| AlN | (Zb) | 550 | 10^{17} | [2.17] | |

место прямые и обратные переходы в $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ и $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Для $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ это справедливо при $x = 0,69$ [2.254], в то время как для $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ это проходит при $x = 0,187$ [2.256].

Нитрид индия галлия ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$) и нитрид индия алюминия ($\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$)

Важность InN и его тройных соединений является следствием меньшей ширины запрещенной зоны относительно GaN, что позволяет варьировать положение уровней в зонной структуре, а также в видимом оптическом диапазоне для оптоэлектронных приборов. Высококачественные слои $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ недавно были выращены методом MBE на сапфировых подложках, например, в [2.114, 2.501]. $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ по структуре кристаллической решетки аналогичен GaN при значении $x = 0,17$, что недавно привлекло внимание к этому материалу для применения в производстве НЕМТ [2.230, 2.485].

Механические и оптические свойства

Впервые методы формирования слоев и оптические свойства тонких пленок $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}$ продемонстрированы и собраны в [2.352]. Первоначальный материал в основном являлся поликристаллическим. Значения теплопроводности и теплоемкость $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ интерполированы из свойств бинарных соединений, как показано в (2.7) и (2.8) с параметрами из табл. 2.16 и 2.17.

Таблица 2.20. Интерполяция эффективных масс в III-N тройных материалах

| | $C_{mp,AB}$ (Wz) | $C_{mp,AB}$ (Wz) | Ссылки |
|-------------------|---------------------|---------------------|----------------|
| $Al_x Ga_{1-x} N$ | 0,0048 | 0 | [2.127, 2.485] |
| $In_x Ga_{1-x} N$ | 0 | 0 | [2.485] |
| $In_x Al_{1-x} N$ | 0 | 0 | [2.485] |

Wz — вюрцит.

Таблица 2.21. Интерполяция ширины запрещенной зоны в III-N тройных материалах

| | $C_{Egap,AB}$ (Wz) | $C_{Egap,AB}$ (Zb) | Ссылки |
|-------------------|-----------------------|---------------------------|----------------|
| $Al_x Ga_{1-x} N$ | -0,7, -1,33 | Γ : -0,7, X: -0,61 | [2.410, 2.485] |
| $In_x Ga_{1-x} N$ | -1,4 | -1,4 | [2.279, 2.485] |
| $In_x Al_{1-x} N$ | -2,5 | Γ : -2,5, X: -0,61 | [2.485] |

Wz — вюрцит, Zb — цинковая обманка.

Основные транспортные свойства носителей заряда

Аналогично InGaAs и InAlAs первоначально ожидали для InN и его соединений наличия меньшей эффективной массы, чем у GaN [2.128]. Однако высококачественных пленок, особенно с высоким содержанием In, не удалось получить выращиванием методом MOCVD, как указано в [2.181]. Метод MBE-выращивания позволил вырастить InN с улучшенным качеством материала [2.86]. Первоначальная подборка транспортных свойств в $In_x Ga_{1-x} N$ дана в [2.54, 2.453] и в приведенных там ссылках.

Транспортные свойства носителей заряда при высоких полях

Анализ $In_x Ga_{1-x} N$ со структурой вюрцита методом Монте-Карло дан в работе [2.113]. Анализ основан на неверном значении ширины запрещенной зоны InN. Анализ максимальных значений скоростей носителей заряда и подвижности в тройных материалах сильно зависит от рассеяния в сплаве в результирующем тройном материале [2.34]. Параметры пиковой скорости v_{peak} , скорости насыщения v_{sat} и критической напряженности электрического поля E_{crit} представлены в табл. 2.19. Оценки зависимостей транспортных свойств носителей заряда от температуры $In_x Ga_{1-x} N$ со структурой цинковой обманки, выполненные по методу Монте-Карло, даны в работе [2.17], а также представлены в табл. 2.19. Значения критической напряженности электрического поля сильно уменьшаются с увеличением содержания индия. Аналогично скорость насыщения $In_x Ga_{1-x} N$ увеличивается при переходе от GaN к InN. Весьма малое количество данных характеризуют свойства переноса зарядов в $In_x Al_{1-x} N$. $In_x Al_{1-x} N$ с большим содержанием Al по своим изолирующим свойствам аналогичен AlN. $In_{0,17} Al_{0,83} N$ —

наиболее важная композиция для понимания. Результаты расчетов и первичные данные о подвижности в полях слабой напряженности можно найти в [2.452]. Предсказанные значения подвижности в электрических полях малой напряженности $\leq 200 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ для $x \leq 0,5$. Процессы переноса зарядов в InAlN в электрических полях большой напряженности до сих пор не очень хорошо изучены.

Зонная структура

Для изучения зонной структуры $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ и $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{N}$ были выполнены расчеты нелокальных псевдопотенциалов, но они все еще были основаны на фундаментальном значении ширины запрещенной зоны 1,89 эВ [2.127]. Смещение зоны проводимости структуры InGaN/GaN описано в [2.530]. Соотношение смещения от зоны проводимости к валентной зоне составляет 58:42. Сообщается, что в результате улучшения качества выращенного материала путем использования метода МВЕ получены материалы с малой шириной запрещенной зоны, например, в [2.501]. Параметры зонной структуры были тщательно исследованы относительно свойств InGaN в [2.86, 2.278]. InN оказался полупроводником с малой шириной запрещенной зоны с энергией запрещенной зоны 0,77 эВ при комнатной температуре [2.86]. Эти данные получены на основе методов оптической абсорбции, фотолюминесценции и фотомодулированного отражения. Структуры с большими значениями ширины запрещенной зоны пока только предполагаются к рассмотрению, например, в [2.163, 2.373, 2.523].

2.2. Полярные полупроводники для электроники

Вслед за основными значениями свойств объемных материалов требуется дальнейший анализ материала. В III-N-полупроводниках обнаружены значительные эффекты электрической поляризации, которые доминируют, особенно на границах раздела [2.499]. Этот факт заслуживает отдельного обсуждения, так как эффекты намного сильнее, чем в любом из полупроводников, которые использовались до сих пор. Хороший обзор дан в [2.499]. Точное определение концентрации легирующей примеси, профилей распределения концентрации легирующей примеси — это одна из ключевых тем кремниевой электроники, основанной на методе CMOS [2.32, 2.149]. Однако для приборов, созданных на базе III-N-материалов, управление эффектами поляризации имеет такое же важное значение или даже более важное, чем профили концентраций легирующей примеси в других полупроводниковых материалах. На рис. 2.3 показана кристаллическая структура GaN со структурой вюрцита, как это представлено, например, в работе [2.11, 2.12]. Структура нецентрально-симметричного кристалла GaN связана с сильной ионизацией и остаточной электрической поляри-

зацией полупроводника. Рис. 2.3 показывает планарную природу поляризации. В дальнейшем анализ кристаллической структуры позволит объяснить физические механизмы управления зарядами, общую концентрацию носителей заряда и их зависимость от структуры слоя.

2.2.1. Спонтанная поляризация

Понимание базовых принципов условий выращивания материала различными методами в рамках систем AlN/GaN/InN и их влияния на заряд поляризации существует и опубликовано в [2.11, 2.12, 2.90]. Результаты основаны на константах кристаллической поляризации Бернардини и соавторов [2.36]. Важность как спонтанных, так и пьезоэлектрических компонентов отмечается в этой работе, в отличие от ранних публикаций, например, в [2.22]. Спонтанная поляризация имеет место вдоль c -оси в кристаллах со структурой вюрцита и ведет к образованию сильных электрических полей с напряженностью 3 МВ/см [2.12]. Результаты для поляризационно-индуцированных зарядов (PIC-модель) сравниваются в [2.12] с экспериментальными результатами для каналов в НЕМТ, полученными к дате публикации. В этот промежуток времени был достигнут дополнительный прогресс по улучшению качества III-N-материалов, например вследствие уменьшения дефектов.

Основные результаты по выращиванию слоев III-N-материалов двумя самыми важными методами выращивания MOCVD и MBE, представленные в этих и других публикациях, позволяют сделать следующие выводы:

- абсолютные величины пьезоэлектрических констант III-N-полупроводников в десять раз больше, чем в обычных III-V- и II-VI-полупроводниках [2.36];
- очень похожи значения подвижности носителей заряда, концентрации носителей заряда в слое и качество материала, достигнутое для III-N-полупроводников, выращенных методами MOCVD и MBE [2.96];
- спонтанная поляризация важнее, чем пьезоэлектрическая поляризация для границ раздела гетероструктуры $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ [2.12, 2.36];
- спонтанная поляризация может быть также важна, как и пьезоэлектрическая поляризация, или даже важнее для границ раздела $\text{In}(\text{Al})\text{N}/\text{GaN}$ и вести к очень большим значениям плотности носителей заряда в слое [2.12, 2.36, 2.231];
- полярность заряда, вызываемого процессом поляризации, может быть изменена и даже инвертирована как функция напряжения (механического) и состава материала;
- существует разница между материалами, выращенными методами MBE и MOCVD в части величины поляризации заряженных границ раздела [2.12, 2.90];