



# Содержание

Предисловие редактора перевода.....	11
Введение.....	12
Предисловие.....	17
<b>Часть I. Рынок объемных кристаллов GaN.....</b>	<b>18</b>
<b>Глава 1. Развитие рынка подложек из объемного GaN.....</b>	<b>18</b>
<i>Эндрю Д. Хансер и Кейт Р. Эванс (Andrew D. Hanser, Keith R. Evans)</i>	
1.1. Вводная часть.....	18
1.2. Движители рынка III-N-приборов и прогнозирование.....	19
1.2.1. Генерация света и твердотельное освещение на основе материалов группы III-N.....	19
1.2.2. Электрические системы и электроника высокой мощности на материалах группы III-N.....	21
1.2.3. Позиционирование GaN-подложек на рынках электроники высокой мощности SSL-приборов.....	24
1.2.4. Ключевые факторы успешной коммерциализации подложек из объемного GaN.....	26
1.3. Преимущества и значимость подложек из объемного GaN.....	29
1.3.1. Эксплуатационные характеристики прибора.....	30
1.3.2. Теплопроводность.....	36
1.3.3. Возникновение отказов в приборах за счет термовозбуждения.....	37
1.3.4. Себестоимость прибора.....	38
1.4. Тенденции развития GaN-приборов на подложках из объемного GaN.....	40
1.4.1. Лазеры и светодиоды.....	40
1.4.2. Переключатели питания.....	41
1.4.3. ВЧ-транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT-транзисторы).....	42
1.5. Тенденции развития подложек из объемного GaN.....	43
1.5.1. Хлорид-гидридная эпитаксия из паровой фазы (HVPE).....	43
1.5.2. Аммонотермальное выращивание.....	44
1.5.3. Выращивание из раствора.....	45
1.5.4. Комбинированные методы выращивания.....	45
1.6. Заключение.....	46
Литература.....	47
<b>Часть II. Технология выращивания из паровой фазы.....</b>	<b>51</b>
<b>Глава 2. Хлорид-гидридная эпитаксия GaN из паровой фазы.....</b>	<b>51</b>
<i>Акинори Коукиту и Йошинао Кумагаи (англ. Akinori Koukitu, Yoshinao Kumagai)</i>	
2.1. Введение.....	51
2.2. Термодинамический анализ HVPE-выращивания GaN.....	53
2.2.1. Методика расчета.....	53
2.2.2. Равновесное парциальное давление и главная движущая сила осаждения GaN.....	55
2.3. Эпитаксиальное выращивание кубического GaN на подложке из GaAs (100) [5, 18].....	58
2.3.1. Экспериментальные данные.....	59

2.3.2. Выращивание кубического GaN.....	60
2.4. Сравнительные характеристики процессов выращивания GaN на подложках (111)A и (111)B [7, 31].....	62
2.4.1. Экспериментальная часть.....	63
2.4.2. Сравнение процессов наращивания GaN на поверхностях арсенида галлия (111)A и (111)B.....	64
2.5. Начальный расчет процессов выращивания GaN на поверхностях (111)A и (111)B арсенида галлия.....	67
2.5.1. Методика расчета.....	67
2.5.2. Начальные процессы выращивания GaN на поверхностях (111)A и (111)B GaAs.....	68
2.6. Выращивание толстого слоя GaN на поверхности (111)A подложки из GaAs [48, 49].....	71
2.6.1. Экспериментальная часть.....	71
2.6.2. Выращивание толстого слоя GaN на поверхности (111)A GaAs.....	72
2.7. Приготовление полуизолирующих GaN-подложек, легированных Fe [50, 51].....	77
2.7.1. Экспериментальная часть.....	78
2.7.2. Выращенный на подложках из сапфира и GaAs легированный Fe слой GaN.....	78
Литература.....	82

### **Глава 3. Выращивание объемных кристаллов GaN с помощью эпитаксии из гидридной паровой фазы на затравках монокристаллического GaN.....**

*Б. Лучник, Б. Патужка, Г. Камлер, И. Гжегори и С. Поровски  
(англ. Lucznik, B. Patuszka, G. Kamler, I. Grzegory u S. Porovsku)*

3.1. Введение.....	85
3.2. Экспериментальная часть.....	86
3.2.1. Затравочные кристаллы.....	86
3.2.2. HVPE-реактор и условия выращивания.....	88
3.2.3. Исследование характеристик.....	89
3.3. Экспериментальные данные.....	89
3.3.1. Выращивание кристаллов на кристаллических, пластинчатых затравках малого размера, почти не имеющих дислокаций.....	89
3.3.2. Выращивание кристаллов на мелких иглоподобных затравках, характеризующихся практически полным отсутствием дислокаций.....	96
3.3.3. Выращивание кристаллов на больших GaN-подложках с ориентацией (0001).....	100
3.4. Выводы.....	104
Слова благодарности.....	105
Литература.....	105

### **Глава 4. Изготовление отдельных GaN-пластин на основе эпитаксии из гидридной паровой фазы и с использованием метода отслоения по линии пустот на интерфейсе.....**

*Й. Ошима, Т. Йошида, Т. Эри, К. Ватанабе, М. Шибата, Т. Мишима  
(англ. Y. Oshima, T. Yoshida, T. Eri, K. Watanabe, M. Shibata, T. Mishima)*

4.1. Введение.....	107
4.2. Метод HVPE-VAS в общих чертах.....	108
4.2.1. Концепция метода HVPE-VAS.....	108
4.2.2. Описание процесса.....	109
4.3. Приготовление GaN-шаблона темплейта (или темплита, или квазиподложки) с пористой TiN-пленкой.....	110
4.3.1. Экспериментальная часть.....	110

4.3.2. Результаты.....	110
4.3.3. Механизмы формирования пористой структуры.....	111
4.3.3.1. Формирование наносетчатой структуры путем термической агломерации.....	111
4.3.3.2. Формирование пустот в шаблонном слое GaN.....	112
4.4. HVPE-выращивание на шаблонах из GaN с пористой TiN-пленкой.....	112
4.4.1. Process of HVPE Growth and Separation.....	112
4.4.1.1. HVPE-реактор и исходные материалы.....	112
4.4.1.2. Процесс HVPE-выращивания на шаблоне из GaN с наносетчатой пленкой и отделения подложки.....	113
4.4.2. Механизмы роста и отслоения.....	114
4.4.2.1. Отделение базовой подложки.....	114
4.4.2.2. Механизмы формирования верхних пустот.....	115
4.5. Свойства GaN-пластин, изготовленных с помощью технологии HVPE-VAS.....	116
4.5.1. Структурные свойства.....	116
4.5.2. Электрические свойства [17, 18].....	119
4.5.3. Тепловые свойства.....	120
4.5.3.1. Теплопроводность [17, 18, 29].....	120
4.5.3.2. Коэффициент теплового расширения [18, 26].....	122
4.6. Заключение.....	123
Литература.....	125
<b>Глава 5. Выращивание полярных и неполярных кристаллов GaN с помощью метода HVPE.....</b>	<b>127</b>
<i>Пол Т. Фини и Бенджамин А. Хаскелл (англ. Paul Fini, Benjamin A. Haskell)</i>	
5.1. Введение.....	127
5.2. Гетероэпитаксиальные пленки, включая выбор подложки.....	129
5.2.1. Планарные GaN-пленки с ориентацией в <i>a</i> -плоскости.....	129
5.2.2. Планарные GaN-пленки с ориентацией в <i>m</i> -плоскости.....	134
5.2.3. Планарные, полуполярные GaN-пленки.....	136
5.3. Горизонтальное эпитаксиальное наращивание неполярного, полуполярного GaN.....	142
5.3.1. Горизонтальное наращивание GaN с <i>a</i> -ориентацией.....	142
5.3.2. Горизонтальное наращивание GaN <i>m</i> -ориентации.....	147
5.3.3. Поперечное (горизонтальное) наращивание (LEO) полуполярного GaN.....	149
5.4. Выводы и перспективы развития.....	151
Литература.....	152
<b>Глава 6. Высокоскоростной эпитаксиальный метод выращивания с помощью осаждения металлорганических соединений из газовой фазы (MOVPE).....</b>	<b>154</b>
<i>К. Матсумото, Х. Токунага, А. Убуката, К. Икенага, Й. Фукуда, Й. Яно, Т. Табучи, Й. Китamura, С. Косеки, А. Ямагучи и К. Уематсу (англ. K. Matsumoto, H. Tokunaga, A. Ubukata, K. Ikenaga, Y. Fukuda, Y. Yano, T. Tabuchi, Y. Kitamura, S. Koseki, A. Yamaguchi и K. Uematsu)</i>	
6.1. Введение.....	155
6.2. Характеристики роста AlGaIn и GaN при использовании метода MOVPE.....	156
6.3. Квантово-химический анализ реакции в паровой фазе.....	159
6.4. Быстрое выращивание GaN с помощью высокопроизводительного реактора.....	163
6.5. Анализ и резюме.....	167
Литература.....	169

<b>Часть 3. Технология выращивания из раствора</b> .....	171
<b>Глава 7. Аммонотермальное выращивание GaN в аммоноосновном режиме</b> .....	171
<i>Р. Дорадзински, Р. Двилински, Д. Гарчински, Л. П. Сиржпутовски и Й. Канбара</i> (англ. R. Doradzinski, R. Dwilinski, J. Garczynski, L. P. Sierzputowski)	
7.1. Введение.....	172
7.2. Метод выращивания.....	173
7.2.1. Физико-химические основы.....	174
7.2.2. Измерения растворимости.....	177
7.2.3. Оборудование.....	178
7.2.4. Рекристаллизация с использованием затравки.....	179
7.2.5. Легирование.....	180
7.2.6. Механическая обработка кристаллов.....	180
7.3. Характеристики кристалла.....	182
7.3.1. Структурные свойства.....	182
7.3.2. Оптические свойства.....	187
7.3. Электрические свойства.....	188
7.4. Гомоэпитаксия на аммонотермальном GaN.....	189
7.5. Вывод.....	195
Литература.....	196
<b>Глава 8. Пути реализации аммонотермального метода выращивания объемного GaN</b> .....	199
<i>Тадао Хасимото и Шуджи Накамуро</i> (англ. Tadao Hashimoto, Shuji Nakamura)	
8.1. Вступление.....	199
8.2. Влияние использования минерализатора на аммонотермальный синтез GaN.....	201
8.3. Растворимость GaN в аммоноосновных растворах.....	206
8.4. Выращивание GaN на затравках с использованием металлического Ga в качестве питательного элемента.....	212
8.5. Метод выращивания GaN, где в качестве затравки используется поликристаллический GaN-нутриент.....	217
8.6. Выращивание кристаллов объемного GaN и резка на пластины.....	221
8.7. Заключение.....	223
Литература.....	224
<b>Глава 9. Технология кислотно- аммонотермального выращивания GaN</b> .....	226
<i>Дирк Эрентраут и Юджи Кагамитани</i> (англ. Ehrentraut, Yuji Kagamitani)	
9.1. Введение.....	226
9.2. Краткая история аммонотермального метода выращивания GaN.....	229
9.3. Технология выращивания.....	230
9.4. Химический состав раствора и механизм роста.....	232
9.4.1. Растворимость.....	232
9.4.2. Скорость выращивания и состав раствора.....	234
9.4.3. Степень воздействия кислотности на образование GaN.....	238
9.5. Свойства аммонотермального GaN.....	240
9.6. Перспективы развития технологии аммонотермального GaN.....	246
Литература.....	248
<b>Часть IV. Технология выращивания из расплава</b> .....	251
<b>Глава 10. Выращивание нитрида галлия из раствора под высоким давлением</b> .....	251
<i>Михал Бокowski, Павел Страк, Изабелла Гжегори и Сильвестр Поровски</i>	
10.1. Вступление.....	251

10.2. Метод выращивания.....	253
10.2.1. Термодинамические и кинетические аспекты выращивания под высоким давлением.....	254
10.2.2. Экспериментальная часть.....	256
10.3. Спонтанная кристаллизация с помощью метода выращивания под высоким давлением.....	259
10.3.1. Характер и морфология кристаллов.....	260
10.3.2. Физические свойства кристаллов.....	261
10.4. Выращивание кристаллов на затравке под высоким давлением.....	263
10.4.1. Эпитаксия жидкой фазы в направлении <i>c</i> на различных подложках (LPE).....	263
10.4.2. Моделирование конвекционного переноса в галлии при LPE-выращивании (стационарные решения).....	266
10.4.3. Затравочное выращивание с помощью регулируемого конвекционного потока галлия.....	270
10.4.4. Выращивание в <i>c</i> -направлениях на HVPE-затравке.....	272
10.4.5. Выращивание на HVPE-затравках в неполярных направлениях.....	275
10.4.6. Моделирование процесса конвекционного переноса в галлии (решения, зависящие от времени).....	276
10.5. Применения GaN-подложек, выращенных с помощью метода высокого давления: лазерные УФ-диоды (синей области спектра) производства компании TopGaN Ltd.....	279
10.6. Заключение и перспективы метода выращивания под высоким давлением.....	281
Литература.....	282
<b>Глава 11. Краткий обзор использования метода Na-Flux для выращивания кристаллов GaN большого размера.....</b>	<b>285</b>
<i>Дирк Эрентраут и Элке Мейсснер</i>	
11.1. Вступление.....	285
11.2. Исторический экскурс.....	286
11.3. Экспериментальные условия для выращивания GaN с помощью метода жидкофазной эпитаксии натриевого флюса.....	289
11.4. Механизм роста и дислокации.....	290
11.4.1. Влияние состава флюса на стабильность выращивания и морфологию кристалла.....	290
11.4.2. Механизм роста и влияние на заселенность дислокаций.....	291
11.4.3. Растворимость и скорость выращивания.....	292
11.5. Свойства GaN.....	294
11.6. Перспективы промышленного использования метода натриевого флюса.....	294
Литература.....	295
<b>Глава 12. Выращивание нитрида галлия в растворе низкого давления.....</b>	<b>297</b>
<i>Э. Мейсснер, С. Хусси и Дж. Фридрих (E. Meissner, S. Hussy, J. Friedrich)</i>	
12.1. Вступление.....	297
12.2. Технология выращивания из расплава при атмосферном давлении, метод LPSG (метод выращивания из раствора при низком давлении).....	300
12.2.1. Реакция образования GaN в атмосфере аммиака.....	301
12.2.2. Растворимость азота в Ga-содержащих растворах.....	305
12.2.3. Установка для выращивания, техпроцесс и главные задачи.....	309
12.2.4. Влияние параметров процесса на эпитаксиальный и паразитный рост GaN.....	311

12.3. Развитие структуры и морфологии слоев GaN.....	317
12.3.1. Значение начальной стадии роста.....	317
12.3.2. Макроскопические дефекты при выращивании GaN из раствора низкого давления (LPSG).....	320
12.4. Свойства GaN-материала, выращенного из раствора низкого давления (LPSG GaN).....	321
12.4.1. Структурные свойства и плотность дислокаций GaN, выращиваемого из раствора низкого давления (LPSG).....	322
12.4.2. Электрические свойства.....	328
12.4.3. Примеси.....	328
12.5. Итоги и перспективы.....	329
Литература.....	331
<b>Часть 5. Описание характеристик кристаллов GaN.....</b>	<b>334</b>
<b>Глава 13. Оптические свойства подложек из GaN.....</b>	<b>334</b>
<i>Шигефуса Ф. Чичибу (Shigefusa F. Chichibu)</i>	
13.1. Вступление.....	335
13.2. Оптические характеристики GaN-подложек, выращенных с помощью методов эпитаксии из паровой фазы металлорганических и галоидных соединений.....	336
13.2.1. Спектры фотоотражения экситонных поляритонов в GaN-подложке, полученной с помощью латерального MOVPE-наращивания.....	336
13.2.2. Фотолюминесценция с временным разрешением (TPRL) GaN-подложки, изготовленной с помощью метода MOVPE-LEO.....	342
13.2.3. Низкотемпературные спектры фотолюминесценции (PL) GaN-подложки, изготовленной с помощью HVPE-метода эпитаксиального латерального наращивания.....	344
13.3. Влияние роста в полярном направлении на оптические свойства затравочных GaN-подложек, выращенных аммонотермальным методом.....	346
13.4. Влияние изгиба дислокаций на оптические свойства затравочных GaN-подложек, выращенных с помощью аммонотермального метода.....	348
13.5. Заключение.....	351
Литература.....	352
<b>Глава 14. Исследование точечных дефектов и примесей в объемном GaN с помощью спектроскопии позитронной аннигиляции.....</b>	<b>356</b>
<i>Филип Туомисто (Filip Tuomisto)</i>	
14.1. Вступление.....	356
14.2. Спектроскопия позитронной аннигиляции.....	358
14.2.1. Позитроны в твердых веществах.....	358
14.2.2. Позитроны в дефектах.....	360
14.2.3. Экспериментальные методики.....	364
14.3. Вросшие дефекты.....	368
14.3.1. Образование дефекта: методы выращивания и легирование.....	368
14.3.2. Дефекты и полярность роста.....	372
14.4. Создание дефектов.....	374
14.4.1. Термический отжиг под высоким давлением.....	375
14.4.2. Эксперименты по электронному облучению.....	377
14.5. Заключение.....	380
Литература.....	381

## Предисловие редактора перевода

Пристальное внимание научного и инженерного сообщества к нитриду галлия объясняется всеобщим ожиданием той роли, которую ему предстоит сыграть в развитии твердотельного освещения и сверхвысокочастотных твердотельных приборов большой мощности.

Предлагаемая читателю книга содержит подробный обзор передовых технологий выращивания кристаллов GaN, из которых затем изготавливаются подложки для эпитаксиального выращивания приборных гетероструктур. Все эти технологии имеют иностранное происхождение, и пока не реализованы в России. Однако технологии выращивания приборных структур и производства из них как кристаллов для осветительных приборов, так и сверхвысокочастотных приборов большой мощности в России успешно развиваются и выходят на уровень серийного производства.

Следует отметить, что требования к объемным кристаллам GaN у производителей осветительных кристаллов и мощных СВЧ устройств разные. Так, для мощных СВЧ устройств обязательным требованием является получение полупроводящих подложек, тогда как для светодиодов обычно применяются проводящие подложки.

В области эпитаксиальных технологий для СВЧ применений абсолютным лидером в России является ЗАО «Светлана — Рост». Это первое и единственное в России предприятие, соединившее в себе разработку и промышленное производство (epihouse) эпитаксиальных структур AlN, а также производство пластин с кристаллами заказанных элементов (foundry). Основу эпитаксиальных технологий ЗАО «Светлана — Рост» составляет молекулярно-пучковая эпитаксия.

Ко времени подготовки перевода предлагаемой читателю книги ЗАО «Светлана — Рост» добилось наиболее значимых в России результатов в области нитридных технологий, начало серийный выпуск эпитаксиальных структур нитридов галлия и алюминия для СВЧ применения и впервые в современной России предложило услуги фаундри для производства нитридной СВЧ компонентной базы. Пока нитридные эпитаксиальные структуры выращиваются на подложках карбида кремния, но, как и многие зарубежные производители нитридных полупроводниковых приборов, ЗАО «Светлана — Рост» внимательно следит за развитием технологий производства объемных кристаллов GaN. Этот интерес имеет абсолютно прагматичную подоплеку и направлен на включение подложек полупроводящего GaN в собственный промышленный оборот.

*Виктор Чалый  
Дмитрий Красовицкий*



## Введение

Полупроводниковые материалы интенсивно изучаются с момента рождения кремниевой технологии более 50 лет назад. Возможность настройки с заданной точностью их физических или химических свойств является ключевым фактором электронной революции, длящейся в нашем обществе уже в течение нескольких десятилетий. Полупроводниковые системы, например на кремнии или материалах на основе арсенида галлия, уже достигли своей зрелости, найдя применение в электронике, оптоэлектронике и некоторых других областях.

Другие материалы, как, например III-нитриды, были разработаны позднее под влиянием требований, которые вышеуказанные полупроводники удовлетворить не могли. Свойства III-нитридов (AlN, GaN, InN и других родственных сплавов) делают их прекрасным выбором для эффективных излучателей света как для видимой, так и УФ-области, УФ-детекторов и большого разнообразия таких электронных приборов, как высокочастотные униполярные мощные приборы. 1970 был годом всплеска исследовательской активности в отношении систем на основе нитрида галлия (GaN). Главная задача заключалась в выращивании объемных материалов. Неспособность получать материалы *p*-типа на тот период времени отбила охоту у большинства исследовательских групп заниматься данным вопросом, и их активность сошла на нет через несколько лет. Несколько важных технологических разработок в области выращивания, датированных с середины по конец 1980-х, привели к возрождению исследовательского интереса к GaN и родственным материалам. Акасаки и др. был предложен метод выращивания ровных монокристаллических слоев GaN на инородной подложке (т. е. гетероэпитаксия на сапфире) с использованием тонкого (около 30 нм) буферного слоя AlN, выращенного при низкой температуре. Они также разработали метод производства низкоомного нитрида галлия *p*-типа и продемонстрировали светоизлучающий прибор на базе *pn*-перехода. Это способствовало стремительному развитию и коммерциализации световых излучателей на III-нитридах (светоизлучающих диодов и лазеров). В конце 1980-х Хан и др. (Khan et al.) с помощью гетероэпитаксии на сапфире (в дальнейшем на карбиде кремния SiC) также продемонстрировали наличие поверхностного электронного газа на высококачественном интерфейсе слоев AlGaIn-GaN и транзисторы с высокой подвижностью электронов. Это привело к быстрому улучшению характеристик электронных высокочастотных мощных приборов, обеспечивающих впечатляющую пропускную способность. В настоящее время они и находят применение в коммерческих приложениях.

На данный момент времени основная часть исследований GaN проводится с использованием гетероэпитаксии, так как технология III-N объемных подложек еще недостаточно хорошо развита. Высококачественные GaN-подложки

большого размера до сих пор гораздо более дорогие по сравнению с аналогами из сапфира или SiC, пользующимися предпочтением для гетероэпитаксии GaN. Будущие потребности в объемных GaN-подложках находятся в стадии обсуждения. В связи с меньшим количеством дислокаций (концентрация прорастающих дислокаций  $<10^6 \text{ см}^{-3}$ ) эти подложки обеспечивают явное преимущество за счет увеличения срока непрерывной эксплуатации лазеров. В случае со светоизлучающими диодами данное преимущество не выглядит таким уж безоговорочным. Тем не менее возможно предположить, что все приборы на основе GaN в той или иной мере выиграют от уменьшения концентрации дефектов, что обеспечивается выращиванием на высококачественных подложках из объемного GaN. Таким образом, в последнее десятилетие очень важной областью исследований стала разработка соответствующих технологий выращивания высококачественных объемных GaN-подложек с приемлемой себестоимостью для коммерческого использования. Эта книга дает возможность ознакомиться с текущим положением дел в данной области. Область описания ограничена материалом GaN, который вне всяких сомнений является самым разработанным с точки зрения методов выращивания и его качества. Такая же работа ведется и в отношении AlN, но этот вопрос в данной книге не охватывается.

В настоящее время производство объемного GaN обеспечивается с помощью нескольких методов, детально рассмотренных в данной книге различными авторами. С самого начала было ясно, что методы выращивания должны отличаться от тех, которые используются для приготовления объемного кремния или III-V-материалов с пониженной запрещенной зоной. Применительно к «традиционным» полупроводниковым материалам наиболее распространенный метод заключается в выращивании слитка непосредственно из расплава с помощью затравочного кристалла, для чего в случае с некоторыми соединениями необходимо наличие умеренного давления. Очистка материала может быть также осуществлена с помощью плавки и рекристаллизации, например «зонной плавки». Это опция не является стандартной для III-нитридов, как и для многих других полупроводников с широкой запрещенной зоной, например SiC. Фазовая диаграмма состояния для нитридных материалов такова, что при средних величинах давления материал при повышении температуры не плавится, а разлагается на жидкий металл (Ga для GaN) и газообразный азот  $\text{N}_2$ . Согласно расчетным данным, точка плавления GaN соответствует температуре приблизительно в  $2500 \text{ }^\circ\text{C}$ , но только в случае, если давление превышает  $>4,5 \text{ ГПа}$ . Согласно экспериментальным данным, если порошок GaN сжать под давлением величиной  $6 \text{ ГПа}$ , нагреть до  $2400 \text{ }^\circ\text{C}$ , то при поддержании давления на указанном уровне при охлаждении будет происходить образование монокристаллов GaN размером около  $100 \text{ мкм}$ . Это самая близкая аналогия выращивания из расплава, например для кремния. Необходимость таких чрезвычайно

высоких давлений и температур (а также низких скоростей роста) делает метод выращивания из расплава непрактичным с точки зрения получения кристаллов GaN большого размера.

Большой интерес представляют методы выращивания объемного GaN при атмосферном давлении (или близком к нему) и при температурных значениях  $<1200$  °С. Пока самым популярным методом выращивания является так называемый метод галоидной (или гидридной) эпитаксии из паровой фазы (HVPE). В данном методе в качестве источников газа используются GaCl и NH<sub>3</sub>, причем стандартная температура выращивания при атмосферном давлении составляет 1000—1000 °С. Чаще всего используются сапфировые подложки, причем использование различных затравочных слоев обеспечивает возможность подгонки ближней области подложки. Для 2" подложек скорость роста может составлять вплоть до 0,5 мм/час, а толщина пластины — до  $>1$  см. Легирование Si во время выращивания обеспечивает формирование материала *n*-типа, а *p*-типа — с помощью легирования Mg. За счет нанесения различных рисунков на подложку или на осаждаемый на нее буферный слой рядом с подложкой может быть сформирован рельефный рисунок, который служит в качестве слабой механической связи после (или во время) охлаждения. Это может быть оптимизировано с помощью метода удаления, то есть в результате автоматического удаления подложки во время охлаждения. В противном случае пластины вырезаются стандартным образом из слитка и полируются. Очевидно, такая полированная объемная пластина может использоваться в качестве высококачественной подложки при последующих процессах объемного выращивания.

Еще один очень важный парофазный метод выращивания тонких эпитаксиальных пленок на приборных структурах называется металлоорганической эпитаксией из паровой фазы. В химическом процессе выращивания совместно с NH<sub>3</sub> используются металлоорганические прекурсоры (такие исходные вещества, как триэтил или триметил-галлий). Для получения высококачественных слоев скорость выращивания тонких эпитаксиальных слоев, как правило, составляет около 1—2 мкм/ч. При объемном выращивании величина скорости (выращивания) может быть оптимизирована для гораздо больших значений, вплоть до 50 мкм/ч.

Еще один метод заключается в объемном выращивании из раствора при умеренных температурных значениях ( $<1000$  °С) и высоких давлениях. Данный метод использовался в течение нескольких десятилетий для выращивания кварцевых кристаллов большого размера. В так называемом аммиачно-термальном методе выращивания GaN применяется раствор поликристаллов GaN в сверхкритическом NH<sub>3</sub> с минерализатором, выдерживаемым под давлением величиной, как правило, в диапазоне 100—300 МПа. Кристаллы растут на затравке GaN при типичном температурном градиенте в диапазоне 400—600 °С. Пока удалось



добиться скорости выращивания в 1—4 мкм/ч. Однако существует вероятность, что с увеличением размеров системы выращивания с учетом условий ее оптимизации в будущем можно будет добиться получения слитков очень большого размера. На данный момент времени максимальный размер слитка составляет 2" (5 см). Другой метод получения объемного GaN заключается в выращивании кристаллов из металлического расплава, используемого для растворения нитрида галлия. При высоких значениях температур и давлений удается добиться определенной растворимости GaN в Ga, что обеспечивает получение объемных кристаллов за счет выращивания из раствора. Была показана экспериментальная возможность выращивания из раствора Ga тонких пластинок нитрида галлия сантиметрового размера в атмосфере N<sub>2</sub> при понижении температуры до значения около 1600 °С. Данный метод до сих пор имеет ограниченную возможность роста кристаллов и затравки. В вибрационном методе выращивания Na/A в качестве флюса используется Na. Процесс выращивания начинается с затравки при среднем температурном градиенте (700—800 °С) и давлениях порядка 50 бар. За последнее время данный метод был существенно улучшен: скорость выращивания была увеличена до 30 мкм/ч и получены слитки диаметром два дюйма при толщине в несколько миллиметров. В стадии разработки находятся также многие другие методы выращивания из расплава при атмосферном давлении.

Качество объемных кристаллов GaN, получаемое с помощью вышеуказанных методов, как правило, великолепное, то есть гораздо лучше, чем материалы, получаемые с помощью эпитаксии на инородных подложках. Учитывая, что при производстве упор на чистоту, как правило, не делается, максимальная степень чистоты с точки зрения остаточных концентраций примесей находится в диапазоне  $10^{16}$ — $10^{17}$  см<sup>-3</sup>. С коммерческой точки зрения максимальный спрос приходится на *n*-примесные и полупроводящие пластины. Однако используемые подходы, как правило, немного отличаются в зависимости от выбранного метода. Ширина кривой качания ДРА (дифракционного рентгеновского анализа) составляет величину порядка 20 угловых секунд, а концентрация прорастающих дислокаций находится в диапазоне  $10^4$ — $10^6$  см<sup>-2</sup>, что является достаточным для самых требовательных приложений.

За последние несколько лет был сделан значительный прогресс в области выращивания объемных GaN-материалов. Скорость выращивания и размер получаемых пластинок были значительно увеличены. Производство GaN-подложек в некоторых исследовательских и производственных лабораториях осуществляется уже штатным образом. Это даст возможность более точного изучения преимуществ применения высококачественных объемных GaN-подложек для эпитаксиального выращивания различных оптических и электронных приборных структур. Стало очевидным, что при выращивании

в случае со светоизлучающими структурами высокой мощности (например используемых для твердотельного освещения), возможно, будет необходимым использование неполярных или полуполярных поверхностей из-за наличия ограничений, влияющих на эффективность излучения в виду наличия присущей Оже-рекомбинации в активной области квантовой ямы. Для решения этой задачи пластины большого размера или кристаллы необходимо нарезать в заданном кристаллографическом направлении. Так как гетероэпитаксиальное выращивание приборных структур в неполярном и полуполярном направлениях с низкой концентрацией дефектов оказалось достаточно сложной задачей, то такой спрос на пластины для неполярного или полуполярного выращивания может стимулировать дальнейшее развитие и использование объемных GaN-подложек. В конечном итоге решение об использовании объемных GaN-подложек будет приниматься на основании экономических факторов. Подобно своим аналогам, использующимся в гетероэпитаксии, они также должны иметь высокое качество и низкую себестоимость. Главная задача, таким образом, будет заключаться в масштабировании систем выращивания для эффективного производства больших количеств высококачественного материала. В настоящее время многие рассматриваемые здесь методы находятся в фазе перехода на промышленные рельсы, обещающие массовое производство.

Коламбия, США  
Линкёпинг, Швеция  
Март 2010

*М. Асиф Хан  
Б. Монемар*

## Предисловие

Нитрид галлия (GaN) оказался одним из самых важных полупроводниковых материалов для технологий современности. Его будущее обещает быть еще более ярким по мере развития в сторону технологии твердотельного освещения и электронных устройств большой мощности. Основной движущей силой, стоящей за возникновением этой совершенно новой технологией создания приборов на основе GaN, оказались успешные разработки по достижению надежного способа легирования примесью  $p$ -типа и, как следствие, возможность производства светоизлучающих устройств (светоизлучающих диодов и лазерных диодов/LDs). Итоги исследований, проведенные пионером исследований в данной области Шучжи Накамурой/Shuji Nakamura, были опубликованы в работе «Голубые лазерные диоды» первом издании Springer-Verlag от 1997 года (S. Nakamura, G. Fasol).

С тех пор была проделана большая работа в области развития более эффективных приборов на основе GaN, что привело к появлению многомиллиардного долларового рынка. Данный факт является еще более поразительным, учитывая достаточно «сырой» уровень развития технологии производства кристаллических и термически обработанных подложек для приборов на основе GaN. Начиная только приблизительно с 2000 года технология выращивания кристаллов GaN вышла на уровень широкого признания как фундаментальной наукой, так и промышленностью.

Данная книга представляет собой первый доступный для читательской аудитории подробный обзор передовой технологии выращивания кристаллов GaN, отражающий огромный прогресс, произошедший в особенности за последнее десятилетие и подводящий нас к порогу, преодоление которого будет означать достижение нашей общей цели: получение больших кристаллов GaN, не имеющих дислокаций, для изготовления достаточного количества неполярных, полуполярных и полярных GaN-пластин по разумной себестоимости.

Редакция очень благодарна большому количеству признанных лидеров науки и промышленности, сделавших свой вклад в данную книгу. Мы искренне надеемся, что эта книга окажется незаменимым ресурсом для инженеров, исследователей и студентов, занимающихся в области выращивания кристаллов GaN обработкой и изготовлением приборов на их основе как в сугубо научных, так и промышленных целях.

Наконец, что не менее важно, мы выражаем свою благодарность всем, кто участвовал в работе над данной книгой. В частности Дирк Эрентраут признателен профессору Т. Фукуде (T. Fukuda) за сотрудничество, продолжавшееся в течение нескольких лет; он также очень признателен своей жене Юмико/Yumiko за ту поддержку и терпение, которые она ему оказывала за время работы над книгой.

Наконец за сотрудничество при работе над книгой хочется с признанием упомянуть доктора С. Ашерона/Ascheron и г-жу А. Дум/Duhm А.

Сендай/Sendai  
Эрланген/Erlangen  
Варшава  
Март 2010

*Дирк Эрентраут/Dirk Ehrentraut  
Элке Мейсснер/Elke Meissner  
Михал Бокowski/Michal Bockowski*

# Часть I. Рынок объемных кристаллов GaN

## ГЛАВА I

### РАЗВИТИЕ РЫНКА ПОДЛОЖЕК ИЗ ОБЪЕМНОГО GaN

*Эндрю Д. Хансер и Кейт Р. Эванс  
(Andrew D. Hanser, Keith R. Evans)*

Краткое содержание: осуществляется анализ возможностей долгосрочного и краткосрочного применения объемных подложек на основе GaN, а также мотивация и задачи по внедрению соответствующей технологии в конкретные приборы. Краткосрочный спрос на объемный GaN обусловлен, главным образом, лазерными диодами, в то время как долгосрочный — электроникой больших мощностей и твердотельным освещением. Главные условия выхода на большой рынок связаны с необходимостью увеличения серийного производства и уменьшением себестоимости технологий производства GaN-приборов на основе инородных подложек.

#### I.1. Вводная часть

Распространение технологий в нашем обществе носит почти всеохватывающий характер. Почти по всему миру потребление продуктов технологии носит массовый характер, и для удовлетворения растущих технологических потребностей создаются обширные производственные мощности. Даже в странах третьего мира современные технологии находят свое применение в различных формах, включая беспроводную связь, солнечную энергетику и фармацевтику. Современные технологии самыми разнообразными способами обеспечивают нам более высокий уровень жизни, за что приходится платить с точки зрения потребляемых ресурсов и энергии, а также образованием отходов. Возникает

насушная необходимость в развитии таких технологий, которые за счет меньшего количества потребляемой энергии и, соответственно, меньшего воздействия на окружающую среду могут обеспечивать улучшение уровня жизни.

В процессе развития современных технологий регулярно появляется некая фундаментальная технология, способная произвести революцию. Такие атрибуты информационного века, как транзисторы, интегральные схемы, микропроцессоры и компьютеры, проникшие фактически во все сферы нашей жизни, не появились бы без полупроводниковых материалов на основе кремния. Полупроводниковые материалы на основе III-нитрида и (III-N) имеют все основания претендовать на такую же фундаментальную роль, какую в свое время сыграл кремний. Такие материалы, как нитрид алюминия (AlN), нитрид галлия (GaN) и нитрид индия (InN), станут основой для полупроводниковых устройств, обещающих как новые функциональные возможности, так и возможность обновления существующих технологий. Несмотря на наличие и многих других вероятных и очень даже прикладных применений этих материалов, основные направления сводятся к двум главным: генерация света и регулирование электрической мощности. Эти применения могут ускорить появление новых больших коммерческих рынков, и вероятность этого уже стимулирует агрессивное развитие дополнительных материалов и технологий приборов. Большие перспективы, обещаемые этими применениями, заключаются в способности генерировать большее количество (света, мощности) с меньшими затратами (более высокой энергоэффективностью, меньшим потреблением электричества, меньшими тепловыми потерями). В этой главе мы рассмотрим, какие задачи и какие возможности дает использование материалов на основе GaN и, в частности, какое применение найдут на рынке подложки из GaN. Мы покажем, как будет происходить продвижение на ближнесрочный рынок продукта (подложки GaN) — движущей силы производственных улучшений для эффективного освоения будущих рыночных возможностей.

## 1.2. Движители рынка III-N-приборов и прогнозирование

### 1.2.1. Генерация света и твердотельное освещение на основе материалов группы III-N

Одно из уникальных свойств III-N-материалов заключается в том, что они могут обеспечить эффективную световую эмиссию в диапазоне от ультрафиолетовых волн до инфракрасных. На этих длинах волн возможна разработка очень эффективных полупроводниковых источников белого света. Твердотельное освещение (SSL) на светодиодах (LEDs) предоставляет возможность потреби-



телю заменить менее эффективные и менее надежные технологии освещения, как то: лампы накаливания, люминесцентные и галоидные источники света.

Колоссальное количество энергии уходит на генерацию света для наших каждодневных нужд. Например, в Соединенных Штатах около 22% национальной электрической энергии используется для нужд освещения [1]. Это соответствует мощности около 100 энергетических станций, но в связи с электрическим несовершенством осветительных систем для производства такого количества энергии необходимо в три раза больше электроэнергии. Цена такого количества электрической энергии составляет около 55 миллиардов долларов (США) и продолжает расти с ростом цен на энергоносители, ростом населения и распространением технологии по всему миру. Сегодня необходимость в освещении означает наличие глобального рынка электрических ламп, устройств управления люминесцентными лампами, осветительных приборов и регулирования освещенности, который оценивается приблизительно в 40 миллиардов долларов в год [1]. На смену многим низкоэффективным световым технологиям разрабатываются очень эффективные системы на основе SSL.

При рассмотрении проникновения SSL на рынок осветительных приборов и связанной с этим экономией энергии можно легко видеть, за счет чего данная технология может улучшить нашу жизнь: лучшая энергоэффективность и снижение потребления энергии, выброса углекислого газа и более низкие общие потребительские издержки. Эти преимущества дают толчок развитию новых технологий на базе GaN для систем твердотельного освещения.

Согласно докладу министерства энергетики США, научно-техническая задача долгосрочного характера состоит в достижении высокорентабельных, готовых для рынка систем с величиной световой эффективности в 160 лм/Вт к 2025 году [2]. Это равносильно 60%-му улучшению сегодняшних высокоэффективных источников света, таких как люминесцентных и галоидных, и более чем на 800% в сравнении с лампами накаливания, которые до сих пор являются основными источниками света в мире. Как можно видеть из табл. 1.1 по световой отдаче для различных источников света, для достижения требований, предъявляемых министерством энергетики США, современная технология подлежит серьезному усовершенствованию.

Рынок светодиодов на GaN оценивается приблизительно в 7 миллиардов долларов, и к 2012 должен вырасти приблизительно до 15 миллиардов долларов [4]. Рынок светодиодов на GaN уже достаточно хорошо сформирован. Однако использование светодиодов в SSL в настоящее время достаточно сильно ограничено набором возможных применений, число которых, тем не менее, продолжает расти. Главными факторами сдерживания являются цена и общий уровень технологической готовности светодиодных решений на основе GaN при сравнении с уже существующими решениями. Согласно прогнозам по мере

**Таблица 1.1.** Потенциальный эффект перехода на твердотельное освещение в США

Системы общего освещения			
Главные показатели	SSL-продукт (прибор)	Лампа накаливания, 60 Вт	Компактная люминесцентная лампа
Световая отдача, люмен	1000	1000	1200
Потребляемая мощность, Вт	6,67	60	23
Люмен/Вт	150	16,7	52
Годовое потребление энергии (8 часов в день, 365 дней) (кВт)	19,5	175,2	67,2
Фактор качества по отношению к светодиоду	1	9,0	3,4
Годовой расход на одну лампу (9,3 цента/кВт)	\$1,81	\$16,29	\$6,25
Расчетная величина экономии энергии за год при использовании светодиодного освещения: расчетная базовая величина потребляемой на освещение энергии в 2020 году: 7,5 квадриллионов			
Переход на SSL, %	Экономия, квадриллион	Экономия, (млрд долл.)	
1	0,05	0,33	При равноценной замене люминесцентных ламп и ламп накаливания
10		3,23	
25		7,99	
50		16,04	

Примечания: квад. — один квадриллион БТЕ (британская тепловая единица = 1060 джоулей); приблизительно 6,6 миллиардов долларов за квадриллион БТЕ электрической энергии.

усовершенствования технологий приборов рынок светодиодов для SSL должен вырасти к 2012 году [4] до 1,2 млрд долларов, а в долгосрочной перспективе — до 20 млрд долларов или более (табл. 1.2).

### 1.2.2. Электрические системы и электроника высокой мощности на материалах группы III-N

Улучшение энергоэффективности электрических систем сокращает потребление энергии для многих применений. Например, электронные приборы быто-

Таблица 1.2. Диапазоны световой отдачи для различных источников

Источник света (лампа)	Типовое значение световой отдачи, лм/Вт
Накаливания	10—18
Галогенная	15—20
Компактная, люминесцентная (включая дроссель стартера)	35—60
Дневного света (люминесцентная) (включая балластный резистор)	50—100
Металлогалоидная (включая балластный резистор)	50—90
Современные SSL-приборы общего назначения	Вплоть до 62
SSL-система, планируемая к 2025	162

вого назначения потребляют в режиме ожидания от 5 до 10% домашнего электричества, что в годовом выражении выливается в сумму порядка 3 миллиардов долларов [5.6].

Согласно данным министерства энергетики США, потребление электрической энергии приборами, находящимися в режиме ожидания, составило за 2004 году цифру в 64,5 миллионов мегаватт [7]. Такие потери эквивалентны количеству энергии, производимой 18 электрическими станциями стандартного типа. Такое потребление мощности в режиме ожидания является результатом использования хотя и дешевых, но неэффективных источников питания, отбирающих значительную мощность, когда электронный прибор не используется. Кроме того, внедрение SSL подразумевает наличие высокоэффективных источников питания и контроллеров, необходимых для поддержания высокого общего коэффициента полезного действия осветительной системы. Электрические системы начинают находить все большее применение в автомобильной промышленности, характеризующейся ростом производства гибридных автомобилей, обеспечивающих большую эффективность транспортных систем. Совместное использование двигателя внутреннего сгорания и электрического повышает КПД транспортного средства и обеспечивает снижение потребления смазочных материалов и выбросы вредных веществ в атмосферу. Согласно результатам одного исследования, расширенное использование гибридных автомобилей обеспечивает возможность сокращения общего спроса на смазку для легковых машин, несмотря на рост их числа и среднюю длину пробега. Одно лишь использование электродвигателя совместно с двигателем внутреннего сгорания увеличивает КПД автомобиля и способствует сокращению выброса в атмосферу углекислого газа и спроса на смазку. Наконец, традиционные электросети, обеспечивающие выработку и подачу электроэнергии к потребителям, начинают дополняться новыми

источниками энергии, включая распределенные и возобновляемые источники энергии, такие как ветровые, солнечные, на биомассе и других типов. Современные энергогенерирующие системы могут выиграть от более эффективного преобразования и коммутации, а более интеллектуальные системы за счет мониторинга нагрузки и возможности расширенного управления различными циклами энерговыработки улучшат эффективность возобновляемых источников энергии. Усовершенствования трансформации напряжений и расширенного динамического регулирования напряжения, в управлении сопротивлением и фазового угла в высоковольтных линиях передачи переменного тока могут быть осуществлены с помощью средств на базе твердотельной технологии [9].

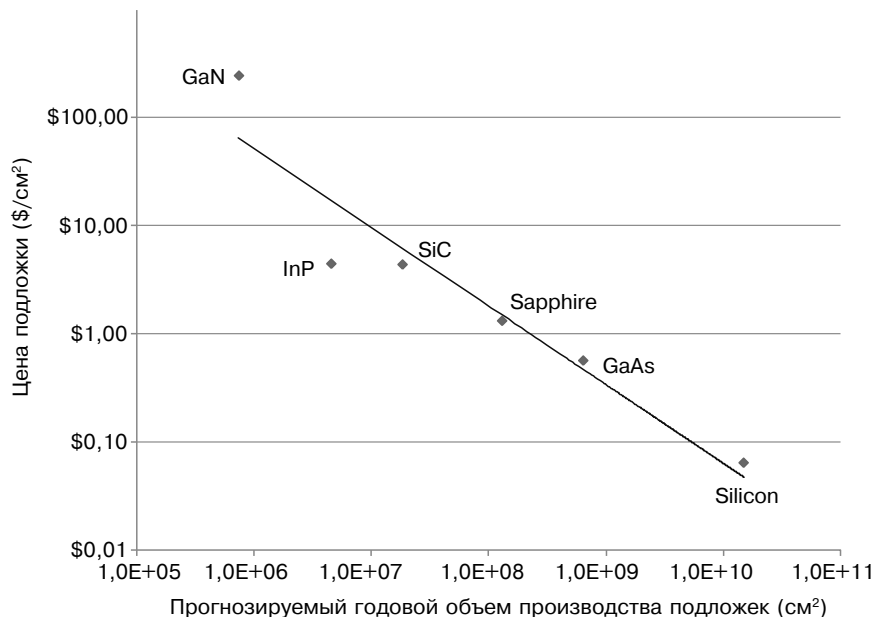
КПД преобразователей энергии для электроники промышленного и бытового назначения, для автомобилей гибридного и электрического типа, для выработки и распределения в электросетях может быть повышен в результате использования более эффективных электрических компонентов. Улучшение эффективности для таких систем начинается с компонентов электроники высокой мощности (HPE) — основной для инвертирующих усилителей и преобразователей мощности. В современных системах эти компоненты представляют собой полупроводниковые, главным образом кремниевые устройства. В связи с характерными ограничениями, свойственными собственным (полу)проводникам, приборы на основе кремния имеют потолок по мощности и температуре, что отрицательно сказывается на эффективности электрической системы. По сравнению с кремнием нитрид галлия обладает свойствами, обеспечивающими улучшенную характеристику полезной мощности. Нитрид галлия характеризуется широкой запрещенной зоной (3,4 эВ), большой величиной напряженности электрического поля при пробое (~3 МВ/см) и высокой подвижностью электронов (~1500 см<sup>2</sup>/В·с при комнатной температуре). Благодаря этим свойствам обеспечивается низкая величина сопротивления при включении, низкие потери коммутирования, хорошая производительность при высоких температурах и высокая эффективность преобразования мощности у таких приборов, как диоды Шоттки и полевые транзисторы (FETS). Приборы с такими характеристиками могли бы улучшить эффективность электрических систем и существенно сократить энергопотребление в мировом масштабе, оказывая влияние практически на любой аспект их применения, обеспечивая потенциальную экономию средств на сумму в 30 миллиардов долларов в год [10].

В 2008 году общедоступный рынок электроники на основе GaN составлял более 350 миллионов долларов, он, по всей вероятности, обещает занять существенную долю долгосрочного рынка электроники высокой мощности, оцениваемого по прогнозам в 22 миллиарда долларов [11].

### 1.2.3. Позиционирование GaN-подложек на рынках электроники высокой мощности SSL-приборов

Для вхождения приборов на основе GaN на рынки электроники высокой мощности и SSL необходимо серьезное усовершенствование технологии. Для выхода на эти рынки технологии должны созреть до уровня возможности изготовления материалов и приборов, используемых в компонентах силовых и осветительных систем. Для изготовления приборов с высокими эксплуатационными характеристиками нужны высокотехнологичные процессы с низкой себестоимостью. Успешная реализация приборов на основе GaN будет зависеть от двух важных компонентов. Во-первых, должны улучшиться эксплуатационные характеристики приборов на основе GaN. Например, для того, чтобы сравняться с конкурирующими предложениями и превзойти их, значение светоотдачи должно возрасти более чем в три раза. С течением времени светоотдача светодиодов на основе GaN постепенно улучшилась за счет внесения усовершенствований при проектировании; однако остается надеяться, что данный технологический прием сможет остаться на текущей траектории производительности. Большинство стандартных светодиодов в настоящее время выращивается на инородных (не нитридных подложках). Большое количество дефектов в материале объясняется неполным соответствием свойств подложки и эпитаксиальных слоев. Такой способ изготовления характеризуется неполным соответствием свойств подложки и эпитаксиальных слоев, с чем связано появление дефектов и собственно деградация эксплуатационной характеристики прибора. Продолжается исследование воздействия данных дефектов на эксплуатационную характеристику светодиодов, а также возможность ее фундаментальной зависимости от качества материала. Это, в частности, очень важно для приборов с высокой плотностью тока, обеспечивающих большую светоотдачу. На пути реализации полного потенциала электронных приборов большой мощности, используемых в качестве источников света, необходимо преодолеть два серьезных барьера: производительность и надежность.

Второй путь заключается в удешевлении технологии GaN-приборов, где самым дорогим компонентом может оказаться подложка. Снижение себестоимости обеспечивается за счет увеличения производства. Нахождение экономической целесообразности является одной из главных задач в производстве полупроводников, а необходимость расширения производства диктуется рыночным спросом. Приборы на основе GaN пользуются серьезным спросом. Рынок светодиодов на основе GaN-подложек только начинает формироваться, причем исключительно для высокотехнологичных применений вследствие низкого уровня цен доминирующих технологий. Приборы на инородных подложках характеризуются адекватной производительностью для светодиодных применений, и уровень цен для таких эпитаксиальных пластин из GaN явля-



**Рис. 1.1.** Прогноз цены квадратного сантиметра подложки в зависимости от годового объема продукции (пластин) для полупроводниковых подложек

ется низким отчасти из-за большого производства и низкой себестоимости. В результате в связи с высокой себестоимостью, которая обусловлена низким выходом годных, новоявленные светодиодные технологии на основе подложек из объемного GaN на этом рынке пока еще появиться не могут. Таким образом, необходимо выяснить, какие рынки в краткосрочной перспективе будут не критичны в отношении к указанным недостаткам объемных GaN-подложек. Так как стоимость технологического оборудования по выращиванию и исходных материалов для GaN- и GaAs-подложек сопоставима, то в долгосрочной перспективе производственная себестоимость GaN должна подойти вплотную к подложкам из GaAs; однако следует помнить, что себестоимость подложки — всего лишь одна составляющая производственной себестоимости для заданного прибора с учетом таких требований, как надежность, производительность и форм-фактор (рис. 1.1).

Производители объемных GaN-подложек осознали, что существуют промежуточные возможности и ниши, с помощью которых можно добиться требований по производительности и цене, предъявляемых на более крупных рынках SSL и электроники высокой мощности.

Именно краткосрочные и среднесрочные рынки дают шанс выйти на необходимый уровень производства, увеличить торговые обороты, выход годных, сократить себестоимость и, таким образом, обеспечить себе выход на новые,

**Таблица 1.3.** Применение GaN для светодиодов, приборов высокой мощности и лазерной техники

Светодиоды	Приборы высокой мощности	Лазерные диоды
Подсветка (мобильные устройства, ЖК-дисплеи)	ВЧ-усилители мощности для аппаратуры связи и радаров	Оптические носители данных
Полноцветные экраны больших форматов	Импульсные источники питания	Проекторы
Сигнальные и рекламные указатели	Энергетические установки спутников	Промышленная печать
Осветительные системы общего назначения	Высокотемпературная электроника	Испытания и измерения (спектроскопия, зондирование)

более крупные рынки за счет роста и постоянного усовершенствования (смотри табл. 1.3 с данными о существующих применениях приборов на основе GaN).

Начальные целевые рыночные ниши высокопроизводительных приборов подразумевают наличие некоей дополнительной наценки, связанной с той или иной характеристикой прибора, например высокой энергоэффективностью, меньшим размером и/или меньшей зависимостью от температуры. Вхождение объемных подложек на такие начальные рынки будет происходить достаточно быстро, так как они восполняют потребность в решении задач, с которыми конкурирующие продукты не справляются или делают это неудовлетворительно. Теперь мы приступим к рассмотрению некоторых факторов, учет которых поможет подложкам из объемного GaN удовлетворить рыночные требования, и покажем, каким образом это поможет вхождению на дополнительные рынки.

#### 1.2.4. Ключевые факторы успешной коммерциализации подложек из объемного GaN

Одна из областей, в которой использование GaN-подложек дает немедленную выгоду, — это лазерные диоды на GaN. GaN-светодиоды в первую очередь предназначаются для DVD-плееров и рекордеров высокого разрешения, хотя нельзя забывать и о видеопроекторах высокого разрешения и дисплеях, коммерческой печати, контрольно-измерительной аппаратуре для спектроскопии и биозондирования. В DVD-системах высокого разрешения для считывания и записи данных на оптический диск используется лазерный диод с длиной волны 405 нм, а GaN идеально подходит для работы полупроводниковых лазеров на данной длине волны. Война форматов между Blu-ray и HD DVD в начале 2000-х, по всей видимости, затормозила развитие рынка плееров следующего поколения [12]. Однако к началу 2008 года промышленность приняла стандарт Blu-ray, что от-

крыло дорогу для увеличения производства лазерных диодов и оптических приводов. Согласно прогнозам, уровень продаж Blu-ray DVD-плееров в 2008 году должен был достичь показателя в 5 миллионов штук, а к 2009 году — до 12 миллионов штук [13], в то время как рынок лазерных GaN-диодов должен был достичь ценовой планки в 1,2 миллиардов долларов к 2011 [14].

Типичные Blu-ray плееры потребляют приблизительно 20 мВт [15] при сроке эксплуатации, превышающем 10 тысяч часов в непрерывном режиме работы лазера. С разработкой лазеров более высокой мощности скорость записи DVD-рекордеров увеличится. Потребляемая мощность лазерных диодов при считывании/записи варьируется от 125 мВт для 2-стандартной скорости записи, до 170 мВт (импульсный режим) для 4-стандартной скорости записи [16] и до 250 мВт для 8-стандартной скорости записи [17]. Для лазерных диодов большой мощности количество выделяемого при работе тепла становится значительным. Для обеспечения надежной работы на более высокой мощности необходимо улучшение качества материалов [18].

Лидером в области разработки GaN-лазеров является Япония. В 2008 году Nichia Corporation, ведущий производитель светодиодов на GaN, держала в своем активе 80% рынка лазерных (оптических) диодов/LD на основе GaN [19]. Nichia имеет в своем арсенале технологию производства как сапфировых подложек, так и подложек из объемного GaN [20], причем разработка и лицензирование технологии GaN LD велась совместно с Sony. Sony, а также Sharp и Sanyo занимаются разработкой LD (лазерных диодов) на основе технологии производства GaN-подложек. Переход к массовому производству замедлился в связи с необходимостью внесения в технологию изготовления лазерных диодов на основе GaN существенных изменений, в связи с чем произошла задержка с выходом Sony Playstation 3 и плееров Blu-ray. Главной проблемой при производстве лазерных диодов (ЛД) оказался выход годных, что связано главным образом с ограниченным количеством подложек из объемного GaN высокого качества [22].

Технологические процессы изготовления лазерных диодов/LD из GaN на сапфировых подложках характеризуются большими концентрациями дислокаций, требовательностью к точности монтажа и расположения приборов на подложке. Несмотря на отсутствие открытых данных по выходу годных GaN LD на сапфировых или объемных GaN-подложках, ожидается, что использование высококачественных подложек из объемного GaN будет способствовать увеличению выхода годных оптимизированного процесса эпитаксиального выращивания благодаря меньшему количеству дефектов, улучшенной однородности и более упрощенным процессам эпитаксиального выращивания. Свидетельством этому является переход всех производителей лазерных диодов с сапфировых подложек на GaN-подложки, в особенности для лазерных диодов высокой мощности.





**Рис. 1.2.** Прогноз роста производства 4-дюймовых GaN-пластин для электроники высокой мощности. Источник: Yole Development

С рыночной точки зрения успешная коммерциализация GaN LD зависит от нескольких ключевых факторов:

- сильный и растущий коммерческий спрос на усовершенствованные полупроводниковые приборы на материалах группы III-N в широком диапазоне применений;
- улучшение свойств материалов из объемного GaN, обеспечивающих высокое структурное качество прибора, а также температурные характеристики, которые невозможно получить с помощью прочих методов;
- получение высокопроизводительных приборов, преимущество которых заключено в свойствах подложки из объемного GaN.

Производители GaN-подложек будут использовать данные рыночные факторы с целью обоснования выделения ресурсов для увеличения производственных мощностей, что сделает подложки из объемного GaN более доступным товаром.

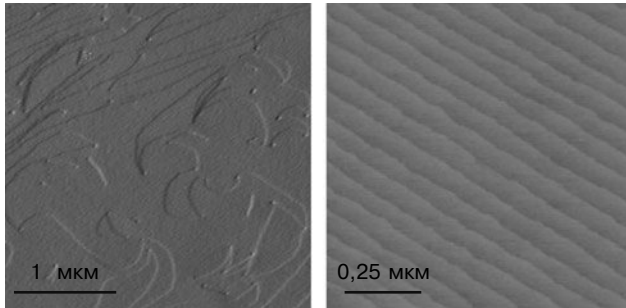
Такое предложение подложек будет способствовать росту рынка приборов коммерческого назначения, а это, в свою очередь, — дальнейшему увеличению возможностей подложек, делающему возможным улучшение ситуации с выходом годных. По мере усовершенствования технологической последовательности операций по изготовлению GaN-подложек за счет снижения издержек на научно-технические работы и налаживания стабильных поставок будет увеличиваться их доступность, отчего останутся в выигрыше и другие новые применения. Коммерческий спрос стимулируется разработкой и выходом на рынок новых приборов, что в свою очередь обеспечивает дополнительную мотивацию производителей подложек к увеличению производства. В качестве

наглядного примера на рис. 1.2 дан прогноз роста производства 4-дюймовых GaN-пластин, предназначенных для применения в силовой электронике, совокупный объем выпуска которых на 2015 г. будет составлять приблизительно 600 тысяч единиц.

Данный прогноз по объему производства свидетельствует о весьма благоприятно складывающейся ситуации для GaN-подложек, но для того, чтобы удовлетворить ценовые ожидания рынка, должны быть найдены способы снижения себестоимости.

### 1.3. Преимущества и значимость подложек из объемного GaN

Несмотря на многочисленные попытки разработать технологию изготовления приборов из SiC и особенно GaAs и InP с использованием более дешевых кремниевых и сапфировых подложек, практически все приборы на основе полупроводниковых материалов разных групп, включая кремний, SiC, GaAs и InP, изготавливаются на соответствующих объемных подложках. Ситуация с нитридными приборами обстоит иначе: большинство нитридных полупроводниковых приборов коммерческого назначения в настоящее время изготавливаются на инородных подложках из Si, SiC и сапфира, что отражает медленный прогресс глобальных усилий по разработке экономически эффективного метода получения высококачественных подложек из объемного GaN и, как следствие, ограниченные поставки таких подложек. Задача выбора инородных подложек при разработке и коммерциализации GaN-приборов представляет собой компромисс с точки зрения степени пригодности подложки в качестве исходного материала для эпитаксиального выращивания GaN. Несмотря на такие преимущества инородных подложек, как хорошая доступность больших размеров, высокое качество и низкая себестоимость, у этого гетероэпитаксиального метода существует и ряд хорошо известных недостатков: рассогласование параметров кристаллической решетки, рассогласование коэффициентов теплового расширения и химическая несовместимость между подложкой и эпитаксиальными слоями. Тем не менее, благодаря многим годам, потраченным на усовершенствование технологии инородных подложек, были разработаны процессы эпитаксиального выращивания, обеспечившие возможность коммерциализации GaN-светодиодов для многих применений. Этот путь развития также привел к появлению ряда принципиально новых методов эпитаксиального выращивания и конфигураций подложек, обеспечивающих некоторое сокращение концентрации дислокаций в гетероэпитаксиально выращенных GaN-слоях. В качестве примера можно привести технологии эпитаксиального



**Рис. 1.3.** Изображения эпитаксиальных пленок, полученные с помощью атомной силовой спектроскопии, на сапфире (слева) и на подложке из объемного GaN (справа). Концентрация дислокаций для пленки, выращенной на сапфире, составляет  $>10^9$  см<sup>-2</sup>, и непараллельный характер наращиваемых на ее поверхности ступенек обусловлен прорастающими дислокациями. Концентрация дислокаций в пленке, выращиваемой на объемном GaN, составляет приблизительно  $10^6$  см<sup>-2</sup>, и монослойные ступеньки практически параллельны. Источник: A. Allerman, Sandia National Laboratories, и R. Dupuis, Georgia Institute of Technology

горизонтального наращивания (ELOG) и кантилеверной эпитаксии (*прим. пер:* или *pendo-epitaxy*), но каждая из них увеличивает себестоимость и сложность эпитаксиального процесса. Многие производители светодиодов осуществляют переход на сапфировые подложки с нанесенным рисунком (PSS), обеспечивающие лучшие характеристики при незначительном увеличении себестоимости (рис. 1.3).

Основные преимущества подложек из объемного GaN особенно подчеркивают недостатки методов на основе инородных подложек. Высокий уровень проникновения на рынок подложек из объемного GaN обусловлен возможностью реализации в потенциальных приборных применениях, присущих только этому материалу достоинств. Вопрос о том, как происходит усложнение прибора и каким образом использование подложки из объемного GaN влияет на формирование себестоимости, будет рассмотрен довольно подробно ниже.

### 1.3.1. Эксплуатационные характеристики прибора

Задача оптимизации рабочих характеристик прибора подчиняется одному простому правилу: наилучшее качество прибора напрямую зависит от наивысшего качества эпитаксиальных приборных слоев. В данном случае под высоким качеством подразумеваются несколько вещей, но в первую очередь — необходимость наличия максимального соответствия полученной структуры эпитаксиального слоя проектному и отсутствия или по крайней мере незначительного наличия структурных дефектов. Высококачественное эпитаксиальное выращивание приборов в свою очередь зависит от сочетания правильного выбора подложки и оптимизированного метода эпитаксиального выращивания.

Как было уже показано выше, высокое структурное качество обуславливается высоким качеством приборного эпитаксиального слоя: точной толщиной и сочетанием различных приборных слоев, плоскими гетерограницами, резкими профилями легирования и низкими концентрациями дефектов. Несмотря на то, что главное преимущество использования подложек из объемного GaN практически во всех приборах заключается в структурном качестве приборного эпитаксиального слоя, иногда также сложно понять, каким образом структурное качество влияет на эксплуатационные характеристики или надежность конкретного прибора или применения. Ответ по большому счету заключается в определении наиболее важных свойств эпитаксиальной приборной структуры и в том, каким образом подложка из объемного GaN влияет на эти свойства. Например, чтобы иметь коммерческий спрос, оптические накопители данных на лазерных диодах голубого цвета и почти УФ-диапазона, их выходная мощность и надежность должны удовлетворять определенным пороговым значениям. Систематические исследования показали, что надежность лазерного диода находится в сильной зависимости от концентрации дефектов в активных областях прибора для заданной выходной мощности и, соответственно, существенно выигрывает при использовании подложки из объемного GaN. Однако, как показала практика, использование подложки из объемного GaN для других приборов далеко не всегда дает такое преимущество. В сводной табл. 1.4 перечислены реальные и прогнозируемые преимущества использования подложек из объемного GaN для наиболее распространенных на данный момент применений, а также анализ преимуществ использования GaN-подложек в некоторых конкретных применениях.

#### *Лазерные диоды*

С момента первой презентации лазерных диодов на основе GaN Накамурой и др. [Nakamura et al. [23] в данной области был достигнут существенный прогресс. Большая часть этой работы была осуществлена и продемонстрирована на основе выращивания кристаллов с использованием сапфира в качестве подложки выращивания. Согласно результатам использования данного гетероэпитаксиального метода, высокая концентрация дислокаций и двуслая деформация в слоях GaN тормозит улучшение рабочих характеристик этих лазерных диодов на основе нитрида. Дислокации могут вызвать ухудшение характеристик лазерных диодов, работающих на эффекте квантовой ямы по трем основным причинам [23]: (а) за счет того, что выступают в качестве неизлучающих центров рекомбинации электронов и дырок, ведущих к образованию тепла, а не светового излучения; (б) за счет быстрой диффузии по линиям дислокаций, вызывающей размазывание квантовых ям и короткие замыкания  $p$ - $n$ -переходов; и (в) за счет возмущения фронта эпитаксиального роста, ведущего к автоматической невозможности получения плоских структур. Дислокации могут также быть

причиной увеличения пороговой плотности тока лазерного диода и в конечном итоге сокращения срока жизни приборов [25, 26]. Хорошо известно, что срок жизни прибора увеличивается в том случае, если лазерный диод изготавливается из областей с низкой концентрацией дислокаций с помощью метода эпитаксиального горизонтального наращивания (ELOG), обеспечивающего получение GaN со средним уровнем дислокаций  $10^6 \text{ см}^{-2}$  [27, 28]. Более хорошие

**Таблица 1.4.** Перечень выявленных и прогнозируемых преимуществ использования подложек из объемного GaN для различных приборных применений

Применение	Наглядные преимущества	Прогнозируемые преимущества
Лазер	Увеличенный срок эксплуатации; пониженное значение порогового тока; более высокая выходная мощность; пониженное значение тока утечки; улучшенная теплопроводность; уменьшенное количество дислокаций	Более высокие допустимые мощности и плотности потока энергии
Светоизлучающие диоды	Снижение концентрации неизлучающих центров рекомбинации; пониженное значение тока утечки; улучшенная теплопроводность; улучшенная эффективность; снижение сегрегации, связанной с дислокациями; снижение эффекта старения за счет электромиграции металлов вдоль дислокаций	Дальнейшие улучшения внутренней квантовой эффективности (IQE); незначительное снижение эффективности на более длинных волнах; большие выходные мощности
Высокочастотный полевой транзистор	Более высокая подвижность носителей заряда в канале и величина заряда в канале; большая проводимость канала; уменьшенные буферные утечки; уменьшенные поверхностные состояния	Более высокие рабочие частоты и мощности; более высокая надежность
Переключатели питания и диоды	Высокое напряжение пробоя; более высокая скорость коммутации; более высокая эффективность; уменьшенное время восстановления закрытого состояния	Более высокая надежность; более низкое сопротивление полупроводника в открытом состоянии; улучшенный перенос мощности; более высокая подвижность носителей заряда в канале
Фотодетекторы и фотоэлементы	Низкие темные токи в фотодатчиках и солнечных фотоэлементах; возможность режима Гейгера для фотодатчика	Улучшенная пороговая чувствительность; улучшенный фототок; большая эффективность

результаты для лазерных диодов были также получены на подложках из объемного GaN, выращенных с помощью эпитаксии из гидридной паровой фазы со значениями концентрации дислокации менее чем  $10^5 \text{ см}^{-2}$  [29]. Кроме того, как было уже показано ранее, рабочие характеристики и надежность прибора в случае с лазерными диодами большой мощности зависят от теплопроводности прибора. Отказы лазерных диодов тесно связаны с омическим нагревом и неизлучающей рекомбинацией [28]. Вопросы, связанные с течением тепловых процессов в лазерных диодах, будут рассмотрены ниже.

#### *Светоизлучающие диоды оптического и УФ-диапазона*

Светоизлучающие диоды на основе GaN охватывают широкий диапазон длин волн, и было показано, что производительность устройства (общая излучаемая или выходная мощность и эффективность прибора) зависит в большой степени от выходной длины волны прибора и плотности электрического тока. Большая часть производимых на сегодняшний день светодиодов дневного света является результатом использования в светодиодах голубого цвета люминесцирующего вещества, причем последние имеют максимальный уровень эффективности, если выполнены на базе GaN. Приборы, работающие на более коротких (УФ) или более длинных волнах (зеленого свечения), имеют более низкую эффективность. До сих пор идет широкое обсуждение вопроса относительно того, какими механизмами обусловлено изменение внутренней квантовой эффективности (IQE) для различных длин волн и условий эксплуатации, являющихся основными факторами ухудшения производительности светодиодов. Несмотря на наличие нескольких предполагаемых механизмов, объясняющих снижение эффективности светодиодов при увеличении тока, а именно инжекции носителей заряда и эффектов удержания [30, 31], эффектов пьезоэлектрической поляризации [32], потерь Оже [33], существует доказательство того, что огромную роль в производительности светодиода играет качество материала, из которого изготавливается прибор. В оптическом диапазоне внутренняя квантовая эффективность прибора определяется механизмами эмиссии в активных InGaN-зонах светодиода. Для работы голубого лазера доля индия в квантовой яме из InGaN должна составлять 15–20%, а для зеленого свечения — 25–35%. Падение эффективности, наблюдаемое на больших длинах волн, объясняется как раз такими изменениями состава и соответствующими различиями качества материалов [34]. Большой сложностью выращивания InGaN обязан своей низкой температуре разложения, подтвержденной областью несмешиваемости [35], и рассогласованием параметров кристаллической решетки GaN при увеличении содержания индия. По мере увеличения доли содержания индия происходит ухудшение как качества материала, так и однородности состава квантовых ям. С формированием обогащенных индием областей происходит локализация носителей, что улучшает эффективность работы в синем диапазоне длин волн, но для больших длин волн

эффективность локализации имеет ограниченный характер. Таким образом, светодиоды с более высоким содержанием индия более подвержены неизлучающей рекомбинации в дислокациях InGaN. Было также показано, что образование V-образных дефектов при выращивании InGaN связано с проросшими дислокациями [37]. Предполагается, что уменьшение концентрации таких дефектов может способствовать улучшению производительности светодиодов зеленого свечения [38]. Было показано, что выращивание InGaN посредством молекулярной лучевой эпитаксии/МВЕ на подложках из объемного GaN в отсутствие дислокаций проходит в послойном режиме наращивания. Снижение концентрации дислокаций при выращивании InGaN может обеспечить улучшение качества материала и, следовательно, производительность светодиода. Существует также необходимость нейтрализации неизлучающей рекомбинации при изготовлении светодиодов УФ-диапазона, где внутренняя квантовая эффективность ниже, чем для светодиодов видимого оптического диапазона в связи с отсутствием локализации носителей [34] и типично высокой концентрацией дислокаций. УФ-устройства, работающие на границе энергетической зоны (полосы) GaN, получают значительный выигрыш при использовании GaN-подложки, а светодиоды глубокого УФ-излучения (200 нм <  $\lambda$  < 300 нм) — от AlN-подложки.

#### *ВЧ полевые транзисторы*

У ВЧ полевых транзисторов из GaN на SiC-подложках существуют проблемы с надежностью, которые, как было показано, связаны с захватом носителей заряда в приборах [41]. Однако в данный момент времени утверждать категорично, что прибор, изготовленный на подложке из объемного GaN, будет иметь повышенную надежность, не приходится. Согласно результатам одного известного исследования при сравнении методов выращивания на подложках из SiC и GaN, надежность ВЧ полевых транзисторов на основе GaN оказалась выше. Последние исследования полуизолирующего GaN исследовательской лаборатории ВМФ США свидетельствуют о наличии у ВЧ полевых транзисторов хорошей характеристики в трехсантиметровой полосе (x-диапазоне). По сравнению с аналогичными структурами, выращенными на SiC-подложках [43], у них было также выявлено улучшенное слоевое сопротивление и более высокая подвижность носителей заряда. По результатам текущих исследований, ведущихся в Kuma Technologies (и других компаниях), и по мере выращивания все большего количества полуизолирующих подложек из объемного GaN, используемых для производства транзисторов для высокоскоростных, ВЧ-применений высокой мощности, могут появиться дополнительные доказательства.

#### *Переключатели высокой мощности*

Производительность таких переключающих устройств высокой мощности на основе GaN-подложек, как диоды Шоттки, зависит от концентрации дефектов и, следовательно, чем она меньше, тем лучше производительность.

Было показано, что винтовые дислокации в GaN являются основной причиной утечки обратносмещенного затвора [44, 45]. Выращивание на GaN-подложке обеспечивает уменьшение концентрации дислокаций и, следовательно, уменьшение концентрации винтовых дислокаций на поверхности и величины тока утечки на затворе. Оказалось, что диоды Шоттки из объемного GaN, изготавливаемые на сапфировой подложке, имеют ряд преимуществ, как то: время восстановления диода Шоттки при переключении в обратное направление, обратный пробой и обратный ток утечки [46, 47]. Повышенная активность ряда компаний, специализирующихся на электронике высокой мощности, включая Velox и International Rectifier, свидетельствует о наличии большой заинтересованности в области производства переключающих GaN-элементов на подложках из Si или сапфира, однако для дальнейшего значительного улучшения уровня производительности может возникнуть необходимость к переходу на объемный GaN. На основании ряда японских научных работ, опубликованных за последние два года, можно говорить об интенсивном переходе к разработке переключающих устройств на основе объемного GaN [48—50].

#### *Новые приборные применения*

В научно-исследовательские разработки приборных приложений на основе GaN-материалов стали вкладываться значительные средства. Речь в частности идет о решении задачи перехода на уровень вычислительной мощности в терагерцовом диапазоне и разработке приборов на основе эффекта межподзонных переходов квантовой ямы, например оригинальном детище компании Bell Labs — квантовом каскадном лазере (QCL) [51]. Существует много причин полагать, что использование объемного GaN окажется для этих новых приложений существенным фактором. В самом деле, все неудачные попытки в прошлом получить хороший квантовый каскадный лазер объяснились отсутствием хорошей GaN-подложки [52]. В числе прочих областей применения можно указать технологию преобразования света в электричество, где были разработаны лавинные UV-B-фотоприемники [53] и солнечные элементы на основе InGaN, перспективные с точки зрения разработки приборов сверхвысокой эффективности [54]. Предлагаемая GaN-подложками пониженная концентрация дислокаций обеспечивает желаемое уменьшение величины темных токов (в светодиодах) и улучшенную фоточувствительность солнечных элементов.

### **1.3.2. Теплопроводность**

Многие целевые применения высокого класса на основе GaN-приборов критичны к выходной мощности и к высокой плотности тока. Для достижения твердотельными осветительными системами (светодиоды высокой яркости) уровня светоотдачи в сотни и тысячи люмен необходимы сильные токи. Лазерные диоды также работают при высоких плотностях тока ( $\text{kA}/\text{cm}^2$ ). Удельная



мощность ВЧ полевых транзисторов, усилителей мощности средств беспроводной связи и радаров составляет 5 Вт/мм и более. Для работы переключателей и диодов электроники высокой мощности необходимы сильные токи и высокие плотности тока вплоть до сотен ампер и нескольких сотен ампер на квадратный сантиметр. Такие условия эксплуатации означают сильное самонагревание приборов, причем рабочие характеристики почти всех этих приборов существенно зависят от повышения температуры. Изменение температуры прибора влияет на его рабочие характеристики, включая доминирующую длину волны излучения, интенсивность и эффективность оптических устройств, величину сопротивления при включении и эффективность электронных приборов.

Приборы высокой мощности на основе GaN не могут эксплуатироваться в постоянном режиме без надлежащего температурного контроля, причем главная задача регулирования внутреннего тепловыделения состоит в определении количества тепла, выводящегося из активной области через эпитаксиальные слои прибора.

В процессе исследований был изучен эффект теплопроводности подложки и эпитаксиальных слоев в месте перехода прибора, или так называемая канальная температура. Согласно опубликованным данным измерений, минимальное значение теплопроводности при комнатной температуре для GaN с очень высокой концентрацией дефектов ( $\sim 10^2$  см<sup>-2</sup>), выращенного на сапфировой или SiC-подложке, может составлять  $\sim 1,0$  Вт/см К; для высококачественных подложек из объемного GaN ( $\leq 10^6$  см<sup>-2</sup>) значение теплопроводности составило до 2,3—2,5 Вт/см К [55, 56]. В результате преимущество, связанное с высокой теплопроводностью, например, SiC-подложки может быть нивелировано наличием высокой концентрации дефектов в буферном слое и активной области прибора. Изучение влияния теплопроводности дефектных эпитаксиальных слоев AlGaN/GaN, выращиваемых на SiC, для ВЧ-применений проводилось с помощью метода микрорамановской термографии. Благодаря высокому тепловому сопротивлению GaN-слоя высокое пространственное разрешение микрорамановской термографии (от микронного до субмикронного диапазона) обеспечивает возможность наблюдения температур, значительно более высоких в эпитаксиальном GaN-слое, чем в подлежащей SiC-подложке. Кроме того, в электронных приборах на основе AlGaN/GaN между GaN и подложкой наблюдается тепловое сопротивление [57]. Эти факторы способствуют формированию высокой канальной температуры в полевых AlGaN/GaN-транзисторах для ВЧ-применений, что может сказаться на надежности и производительности прибора.

Параллельно с экспериментальными измерениями был проведен сравнительный анализ влияния нагревания подложек из GaN и SiC с помощью моделирования ВЧ полевых транзисторов на основе AlGaN/GaN. На основе полу-

ченных тепловых моделей было выяснено, что увеличение количества дефектов в эпитаксиальных слоях GaN и AlN, выращенных на SiC, влияет на перенос тепла к подложке и увеличивает максимальную температуру в канале. Результаты рамановских измерений температуры в канале для подложек обоого типа оказались идентичными. В случае с ВЧ-применениями подложки из объемного GaN обещают возможность получения такой же тепловой характеристики, как у SiC, при улучшении качества материала и перспективах увеличения надежности прибора.

За счет использования в лазерных диодах GaN-подложек вместо сапфировых были достигнуты улучшенные температуры перехода, что объясняется улучшенной теплопроводностью первых [28].

### 1.3.3. Возникновение отказов в приборах за счет термовозбуждения

Формирование отказа в полупроводниковых приборах благодаря действию теплового механизма с зависимостью первой степени от конкретного значения концентрации дефектов подчиняется следующему правилу:

$$\tau^{-1} = A[D] \exp(-E_a/kT),$$

где  $A$  — предэкспоненциальный множитель,  $E_a$  — энергия активации, связанная с механизмом формирования отказа,  $[D]$  — концентрация дефектов, связанная со стадией, лимитирующей скорость механизма отказа, и  $T$  — температура зоны отказа. Такое поведение наблюдалось в биполярных гетеротранзисторах на основе GaAs [59], солнечных фотоэлементах [60] и лазерных диодах на основе GaAs [61]. При разработке приборов на основе GaN специалисты компании Sony обнаружили явную зависимость первого порядка срока жизни лазерного диода из GaN от уровня концентрации дефектов в активной области прибора [27]. По сравнению с инородными подложками использование объемного GaN дает большое преимущество для приборов с термической активацией механизма отказов на основе явления прорастающих дефектов. С учетом большей эффективности и улучшенной теплопроводности возможно существование и прочих преимуществ. Через несколько лет должны появиться первые публикации по надежности приборов некоторых типов и в частности ВЧ полевых транзисторах [62], находящихся в данный момент в стадии исследований.

### 1.3.4. Себестоимость прибора

Себестоимость прибора с заданными характеристиками производительности, надежности и размеров состоит из себестоимости исходных материалов, технологического оборудования для эпитаксиального выращивания, этапов