
**РЕАЛЬНАЯ СТРУКТУРА
КРИСТАЛЛОВ**

УДК 548.4

**ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ ПОДЛОЖКИ САПФИРА НА ОСОБЕННОСТИ
МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ И СТРУКТУРНОЕ СОВЕРШЕНСТВО
ТОЛСТЫХ СЛОЕВ GaN, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ
ХЛОРИДНО-ГИДРИДНОЙ ЭПИТАКСИИ**

© 2011 г. А. А. Донсков, Л. И. Дьяконов, Ю. П. Козлова, С. С. Малахов,
М. В. Меженный, В. Ф. Павлов, Т. Г. Югова

ОАО “Гиредмет”, Москва

E-mail: icpm@girmet.ru

Поступила в редакцию 23.09.2010 г.

Установлена зависимость ориентации поверхности толстых слоев GaN, выращенных методом хлоридно-гидридной эпитаксии, от ориентации подложки. На подложках **c**-, **a**-, **r**- и **m**-ориентации были получены слои, ориентированные по плоскостям (0001) для **c**- и **a**-ориентации, (11 $\bar{2}$ 0) – для **r**-ориентации и (10 $\bar{1}$ 3) – для **m**-ориентации. В зависимости от ориентации поверхности слоя GaN поверхностные дефекты, такие как террасы и ямы роста, ограничены различными плоскостями, линии пересечения которых с поверхностью роста перпендикулярны друг другу. Установлено влияние ориентации поверхности подложки сапфира на структурное совершенство слоев, которое возрастет с увеличением толщины слоя независимо от его ориентации. Направления распространения трещин в слое GaN также зависят от ориентации поверхности слоя и определяются в основном линиями пересечения плоскостей {1 $\bar{1}$ 00} слоя с поверхностью.

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментально полученные ориентационные соотношения между сапфировыми подложками и наращиваемыми на них слоями нитрида галлия для случаев использования технологий молекулярно-лучевой эпитаксии и газовой эпитаксии из металло-органических соединений суммированы в [1]. Согласно приведенным в [1] данным, на подложках сапфира с **a**-ориентацией получены слои GaN с ориентациями **c** и **m**, а на подложках с **m**-ориентацией – слои с частично полярными ориентациями (10 $\bar{1}$ 3) и (1 $\bar{2}$ 12). Неполярные слои GaN с **a**-ориентацией получены на подложках с **r**-ориентацией. На таких же подложках выращены слои с ориентацией (1 $\bar{2}$ 16). Систематических данных об ориентационных соотношениях сапфира и нитрида галлия применительно к выращиванию толстых эпитаксиальных слоев методом хлоридно-гидридной эпитаксии (ХГЭ) в литературе не обнаружено, однако известно, что слои GaN с **a**-ориентацией получены этим методом на подложках **r**-сапфира [2]. Что касается слоев GaN с **m**-ориентацией, то известны примеры их выращивания методом ХГЭ на подложках **m**-SiC или **m**-GaN [3].

В процессе роста слоев GaN методом ХГЭ практически не удается получить зеркально гладкую поверхность. На поверхности слоев наблюдаются различные морфологические дефекты, такие как террасы, пирамиды, ямки и др.

Цель работы – определение ориентации кристаллографических плоскостей {*hklj*} слоев GaN относительно кристаллографических плоскостей подложек сапфира, на которых выращивали толстые слои GaN методом ХГЭ, связи геометрии морфологических дефектов, образующихся на поверхности слоя в процессе эпитаксии, с ориентацией поверхности слоев GaN, а также влияние ориентации подложки на структурное совершенство эпитаксиальных слоев GaN.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

При выращивании GaN со структурой вюрцита в качестве подложек использовали сапфировые подложки с различной кристаллографической ориентацией поверхности: (11 $\bar{2}$ 0) (**a**-ориентация) и (10 $\bar{1}$ 0) (**m**-ориентация), (10 $\bar{1}$ 2) (**r**-ориентация), а также традиционно используемые подложки (0001) (**c**-ориентация), которые служили образцами сравнения.

Выращивание эпитаксиальных слоев GaN большой толщины осуществляли методом ХГЭ на установке с вертикальным кварцевым реактором. Подробно режим выращивания эпитаксиальных слоев GaN рассмотрен в [4].

Морфология поверхности и сколы слоев GaN были изучены с использованием оптической микроскопии с интерференционным контрастом Номарского. Для выявления дислокационной

Таблица 1. Взаимная ориентация атомных плоскостей слоя GaN и подложки сапфира в выращенных структурах. Кристаллографические направления в выращенных слоях GaN, задающие оси координат в плоскости слоя

Атомные плоскости поверхности подложки		Атомные плоскости $(hkl)_s$ слоя GaN $(hkl)_s$ сапфира	Кристаллографические направления выращенных слоев GaN, задающие оси координат в плоскости слоя	
Условные обозначения	$(hkl)_s$	$(hkl)_s$	Ось x	Ось y
с	$(0001)_s$	$(0001)_s$	$\langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$	$\langle 01\bar{1}0 \rangle$
а	$(11\bar{2}0)_s$	$(0001)_s$	$\langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$	$\langle 01\bar{1}0 \rangle$
г	$(\bar{1}012)_s$	$(11\bar{2}0)_s$ 2^0 от $(\bar{1}012)_s$ подложки	$\langle 0001 \rangle 2^0$ к оси x	$\langle 1\bar{1}00 \rangle$
м	$(10\bar{1}0)_s$	$(10\bar{1}3)$	$\langle \bar{1}2\bar{1}0 \rangle$	$\langle 10\bar{1}0 \rangle 32^0$ к оси x

структуры слоев использовали травление в расплаве КОН и NaOH эвтектического состава при 450°C (2 мин).

Оценку структурного совершенства слоев GaN проводили по величине полуширины кривых дифракционного отражения (**КДО**), которые снимали на гониометре ГУР-8 установки ДРОН-3 с использованием $\text{SiK}_{\alpha 1}$ -излучения, используя схему двухкристального спектрометра.

Идентификацию без учета полярности кристаллографических плоскостей и направлений слоев, параллельных кристаллографическим плоскостям и направлениям подложек, определяющих взаимную кристаллографическую ориентацию слоя и подложки, осуществляли на той же установке. Для этого использовали прямоугольную систему координат с осями $x - y$, лежащими в плоскости выращенного слоя. Ось y определяли по положению слоя на гониометре при отражениях: для слоя ориентации (0001) по отражению $(01\bar{1}5)$; для слоя ориентации $(11\bar{2}0)$ по отражению $(20\bar{2}0)$; для слоя ориентации $(10\bar{1}3)$ по отражению $(10\bar{1}2)$. Определение связи геометрии морфологических дефектов, образующихся на поверхности слоя в процессе эпитаксии, с ориентацией поверхности слоев GaN проводили по их расположению относительно той же ортогональной системы координат $x - y$. При этом использовали одну из расчетных сеток проекций на плоскости (0001) , $(11\bar{2}0)$ или $(10\bar{1}3)$, соответствующую кристаллографической плоскости выращенного слоя GaN.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Кристаллографические ориентации слоев GaN относительно кристаллографических ори-

ентаций подложек сапфира, на которых они выращены, приведены в табл. 1.

Как видно из таблицы, выращивание на подложках сапфира **а**-ориентации растет слой ориентации (0001) (другой, известной из литературы возможной ориентации слоя GaN $(10\bar{1}0)$, в наших экспериментах получить на **а**-ориентации подложке не удалось), на подложке **м**-ориентации – слой с частично полярной ориентацией $(10\bar{1}3)$. Слои GaN с неполярной ориентацией $(11\bar{2}0)$ удалось получить только на подложках сапфира **г**-ориентации.

В процессе выращивания слоев GaN на подложки сапфира методом ХГЭ на поверхности слоев образуются различные морфологические дефекты, такие как террасы, пирамиды роста, ямы, а также полосчатый рельеф, связанный с наличием в слоях дефектов упаковки. В зависимости от ориентации поверхности слоя наблюдаемые дефекты имеют на плоскости роста различную кристаллографическую направленность.

Морфология поверхности слоев GaN существенно зависит от ориентации поверхности подложки, а также от толщины слоя. Слои ориентации (0001) , выращенные на подложках **с**- и **а**-ориентации, характеризуются гладкой поверхностью с террасами и ямами роста. Поверхность слоев GaN ориентации $(10\bar{1}3)$ ограничена террасами, образующими между собой угол $\sim 120^\circ$, а также наблюдаются ямы роста. С ростом толщины слоя рельеф поверхности ухудшается, а также изменяется форма ям. Кроме этого, на поверхности слоев наблюдается четко выраженный полосчатый рельеф.

Наиболее сильно развитый рельеф поверхности наблюдается в слоях ориентации $(11\bar{2}0)$. Морфология поверхности с ростом толщины слоя изменяется (рис. 1). На поверхности тонких слоев наблюдаются гребни (рис. 1а), вытянутые

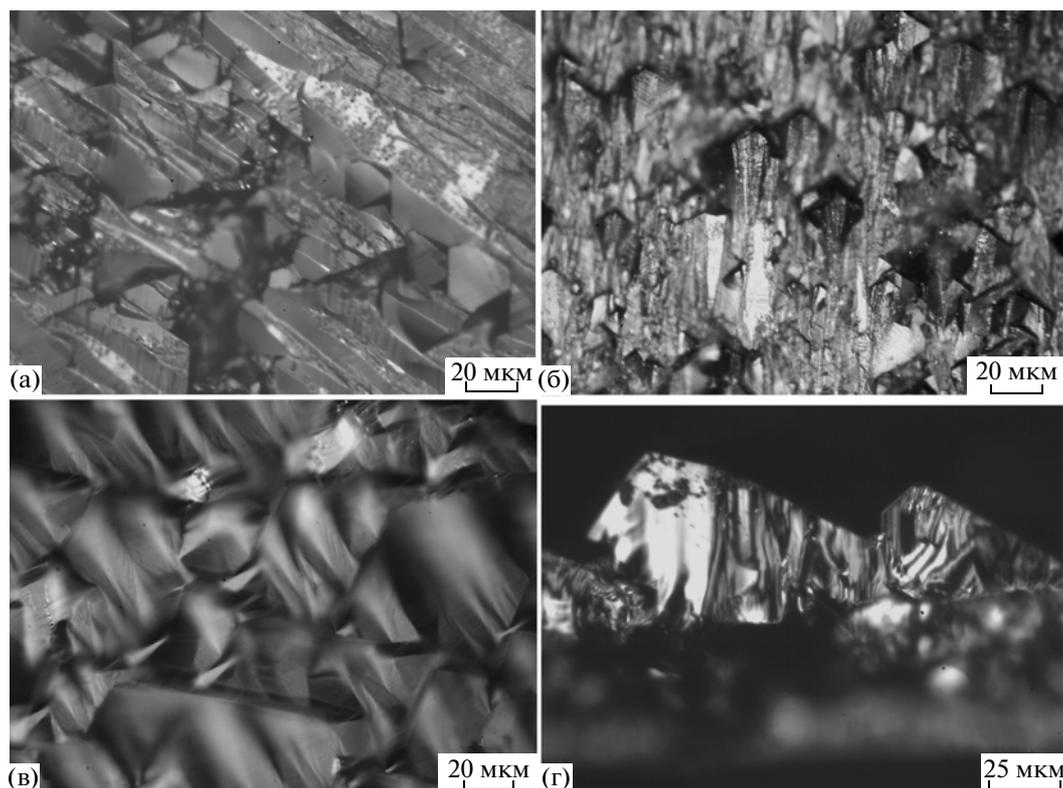


Рис. 1. Изменение морфологии поверхности слоев GaN ориентации $(11\bar{2}0)$ с увеличением толщины слоя: а – 30, б – 120, в – 250 мкм. Скол структуры с эпитаксиальным слоем GaN ориентации $(11\bar{2}0)$ толщиной 250 мкм (г).

вдоль направления $\langle 1\bar{1}00 \rangle$, которые при дальнейшем увеличении толщины слоя разрушаются (рис. 1б). Поверхность толстых слоев ориентации $(11\bar{2}0)$ имеет характерный вид, представляющий собой множество пирамид со сглаженными ребрами и вершиной, каждая из которых имеет в основании параллелограмм (рис. 1в). Стороны параллелограммов представляют собой линии пересечения плоскостей $\{20\bar{2}3\}$ с поверхностью $(11\bar{2}0)$ слоя. Скол, проходящий по плоскости $(\bar{1}0\bar{1}0)$ подложки, выявляет зубчатый рельеф поверхности, что хорошо видно на рис. 1г. Такое изменение морфологии поверхности в слоях ориентации $(11\bar{2}0)$ связано со сложным механизмом роста слоев. При сращивании островков в виде вытянутых гребней с незначительной разориентацией друг относительно друга и подложки образуется много блоков, которые по мере роста толщины слоя разрастаются, поглощая более мелкие. По-видимому, в результате такого механизма роста на поверхности слоя формируются пирамиды. На поверхности также наблюдается полосчатый рельеф, связанный с наличием в слоях дефектов упаковки.

Террасы возникают на поверхности слоев c - и m -ориентации при слоевом механизме роста и ограняются быстро растущими гранями. Кроме того, террасы наблюдаются на боковых гранях пирамид, которые образуются при спиральном росте вокруг какого-нибудь дефекта (инверсионного домена, винтовой дислокации или нанотрубки). Типичные террасы роста, образовавшиеся при росте на подложках различной ориентации, представлены на рис. 2а, 2б. На рис. 2в, 2г показана предполагаемая схема образования террас роста на различно ориентированных плоскостях выращенных слоев GaN.

При построении схем на рис. 2в, 2г учтена форма островков роста, наблюдаемых на подложках различной ориентации (рис. 2д, 2е). На подложках c -ориентации форма островков – это четко выраженные гексагоны, а на подложках m -ориентации образуются островки, представляющие собой треугольные призмы. Как видно на рис. 2в, развитие террас на плоскостях (0001) происходит от островков роста, имеющих форму гексагона (рис. 2д). На плоскости $(10\bar{1}3)$ распространение террас происходит от двух островков треугольной формы (рис. 2е), примыкающих друг к другу.

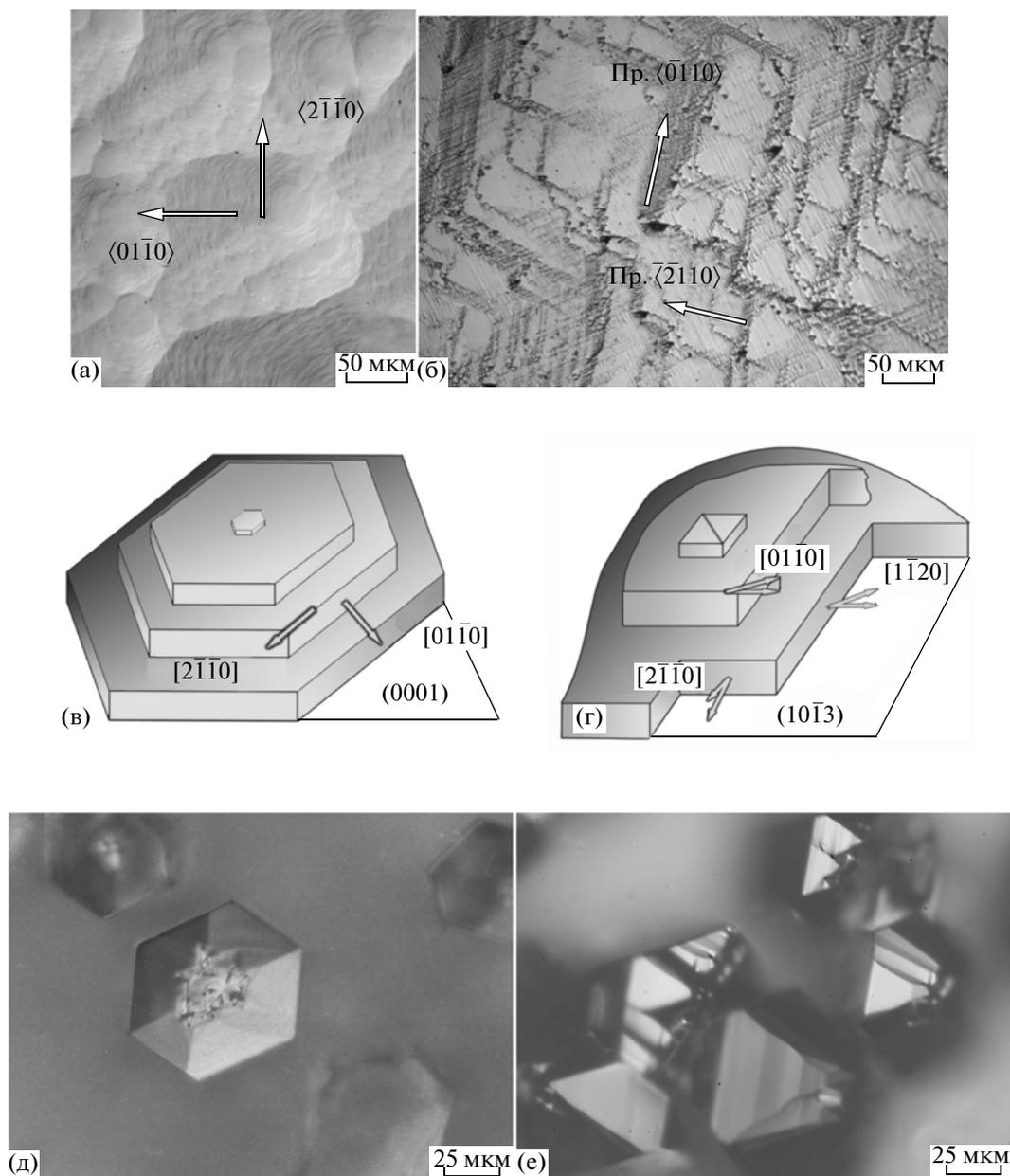


Рис. 2. Типичные примеры террас на поверхности толстых слоев ориентации: (0001) (а), (10 $\bar{1}$ 3) (б), схемы образования террас в слоях GaN ориентации (0001) (в), (10 $\bar{1}$ 3) (г), а также форма островков роста, образующихся при выращивании на подложках различной ориентации: д – с, е – а.

В слоях ориентации (0001), выращенных на подложках с- и а-ориентации (рис. 2а, 2в), террасы развиваются в направлениях типа $\langle 01\bar{1}0 \rangle$, а грани террас совпадают с направлениями типа $\langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$. Развитие террас вдоль направлений типа $\langle 10\bar{1}0 \rangle$ на плоскости (0001) показано в [5].

В процессе эпитаксии на плоскостях типа (10 $\bar{1}$ 3) (рис. 2б) образуются террасы, грани которых определяются пересечением плоскостей типа (1 $\bar{2}\bar{1}0$) с плоскостью роста. Распространение тер-

рас происходит вдоль направлений, почти совпадающих с проекциями направлений $\langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ и $\langle 1\bar{1}\bar{2}0 \rangle$ в плоскости роста. Направления ребер террас в данном случае не могут быть заданы направлениям с малыми индексами, но они совпадают с проекциями направлений $\langle 1\bar{1}00 \rangle$ и $\langle 01\bar{1}0 \rangle$ на плоскость (10 $\bar{1}$ 3) (рис. 2г).

Кроме этого, следует отметить, что в случае ориентации слоя по плоскости (0001) террасы могут распространяться вдоль любого из шести на-

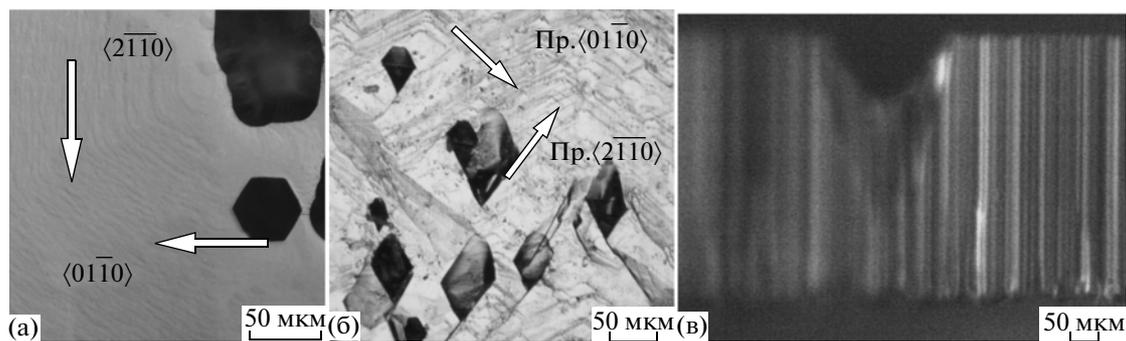


Рис. 3. Ямы роста, образующиеся в слоях ориентации (0001) (а), $(10\bar{1}3)$ (б), яма роста на сколе структуры с эпитаксиальным слоем GaN ориентации (0001) (в).

правлений типа $\langle 0\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ и таким образом приводить к образованию гексагональных пирамид вокруг какого-то источника спирального роста (инверсионного домена, винтовой дислокации или нанотрубки). Такие пирамиды часто наблюдаются на поверхности слоя ориентации (0001) (рис. 2а). В случае ориентации поверхности слоя по плоскости $(10\bar{1}3)$ распространение может происходить только по двум направлениям, совпадающим с направлением проекций $\langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ и $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ на плоскость $(10\bar{1}3)$, и образования пирамид не происходит.

В литературе рассматривается несколько причин появления ям роста на поверхности слоев GaN [6]. Ямы могут возникать из-за колоннообразного механизма роста слоев GaN на ступенях поверхности сапфира [6]. Такие колонны хорошо видны на сколе структуры (рис. 3в). Колонны могут служить инверсионными доменами (ИД) (т.е. N-полярности островков в Ga полярности матрице [7]). Но и при отсутствии ИД довольно большого размера колонны при выходе на поверхность слоя могут образовывать макроскопические ямы [8]. Другой причиной ям роста могут быть частицы, высаживающиеся на ростовой поверхности. Основным источником частиц является паразитный рост на трубке ввода GaCl в реактор и на стенках реактора. Эти частицы переносятся на поверхность подложки потоками газов, подаваемых в реактор [8].

Ямы роста в слоях GaN, ориентированных по плоскостям (0001) и $(10\bar{1}3)$, имеют четкую кристаллографическую огранку. Ямы роста в слое ориентации (0001) представляют собой перевернутую гексагональную пирамиду [8]. Ребра, ограничивающие ямы на поверхности, идут вдоль направлений типа $\langle 01\bar{1}0 \rangle$ (рис. 3а). Направления ребер ямы развернуты на 90° по отношению к направлению граней пирамид. Анализ большого количества структур с толщиной слоя от ~ 40 до

400 мкм показал, что по мере роста толщины слоя средний размер ям не увеличивается, при этом остается постоянной как средняя глубина ям, так и ее размер на плоскости роста. Связано это с тем, что по мере увеличения толщины слоя происходит латеральное зарастивание ямки. Следы такого зарастивания хорошо видны на рис. 3в, на котором показан скол структуры через центр ямки. Видно, что в окрестности ямки наблюдается нарушение регулярной структуры скола в виде колонн.

На поверхности слоев GaN ориентации $(10\bar{1}3)$ наблюдаются ямы роста треугольной формы (при малой толщине слоя), которые в процессе роста толщины слоя увеличиваются в размере и их форма изменяется с треугольной на ромбовидную (рис. 3б). Ребра ям роста представляют собой линии пересечения плоскостей типа $\{01\bar{1}0\}$ с плоскостью роста $(10\bar{1}3)$. При этом направление этих линий не совпадает с направлением с малыми индексами. Однако следует указать, что и в этом случае, как и при выращивании на плоскости (0001), направления террас и ребра ям роста взаимно перпендикулярны (рис. 3б). Причина такого соотношения направлений террас и ребер ям роста не ясна. На плоскости ориентации $(11\bar{2}0)$ ямы роста не наблюдаются.

В слоях GaN ориентации (0001) дефекты упаковки наблюдаются редко [9]. В неполярных $(11\bar{2}0)$ и полуполярных $(10\bar{1}3)$ слоях GaN, выращенных на подложках сапфира r- и m-ориентации, образуется большая плотность дефектов упаковки. Механизм образования таких дефектов упаковки при выращивании на подложке неполярной ориентации пока не совсем ясен, однако предполагают, что дефекты упаковки образуются на островках N-полярности [10]. При пересечении плоскости $(10\bar{1}0)$ залегания дефектов упаковки с поверхностью слоя ориентации $(10\bar{1}3)$ создается полосчатый рельеф, идущий вдоль на-

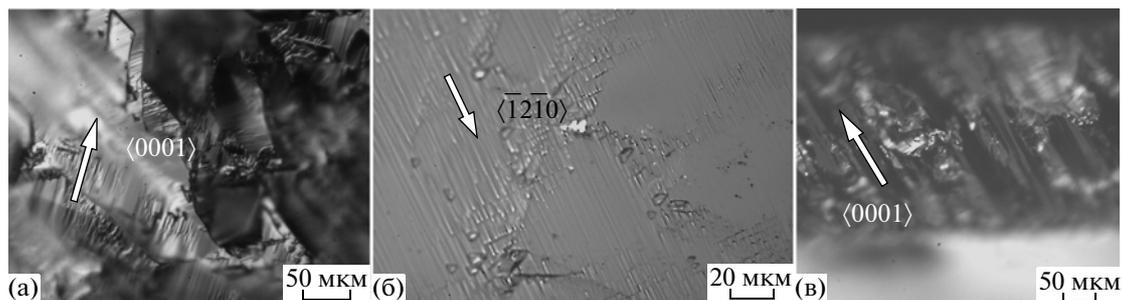


Рис. 4. Полосчатый рельеф, возникающий из-за наличия дефектов упаковки, на поверхности слоев GaN ориентаций: $(11\bar{2}0)$ (а), $(10\bar{1}3)$ (б), скол структуры со слоем ориентации $(10\bar{1}3)$ (в).

правления $\langle \bar{1}2\bar{1}0 \rangle$ [11] (рис. 4б). В слоях, ориентированных по плоскости $(11\bar{2}0)$, пересечения плоскостей залегания дефектов упаковки с плоскостью слоя имеют направление $\langle 0001 \rangle$ (рис. 4а). На сколе слоя ориентации $(10\bar{1}3)$ (рис. 4б) видно, что плоскости $(10\bar{1}0)$, в которых залегают дефекты упаковки и которые образуют колонны, идут под углом $\sim 58^\circ$ к гетерогранице.

Из данных, полученных рентгенодифракционным методом и приведенных на рис. 5, следует, что с увеличением толщины слоя уменьшается величина полуширины дифракционного отражения, что говорит о более совершенной структуре слоев GaN. С увеличением толщины слоя наиболее сильно уменьшается полуширина кривой дифракционного отражения для слоя ориентации $(10\bar{1}3)$. Для слоя ориентации $(11\bar{2}0)$ наблюдается также уменьшение полуширины дифракционного отражения более чем в 2 раза. Для слоев ориентации (0001) , выращенных на подложках с- и а-ориентации, изменения полуширины дифракционного отражения незначительны.

При травлении слоев GaN различной ориентации в смеси щелочей КОН и NaOH на поверхности пленок выявляются достаточно четко ограниченные ямки травления различной конфигурации: в слоях ориентации (0001) – гексагональные, $(11\bar{2}0)$ – остроугольные равнобедренные треугольники, $(10\bar{1}3)$ – вытянутые ромбы.

В эпитаксиальных слоях (0001) ориентации, выращенных на подложках с-ориентации, как правило, наблюдается равномерное распределение дислокаций по поверхности структуры, в то время как в слоях, выращенных на подложках а-ориентации, чаще всего наблюдается скопленные дислокации в виде малоугловых границ. В слоях GaN ориентации $(11\bar{2}0)$ и $(10\bar{1}3)$ дислокации распределены неоднородно по площади структуры.

Зависимость плотности дислокаций от толщины слоев, выращенных на различно ориентиро-

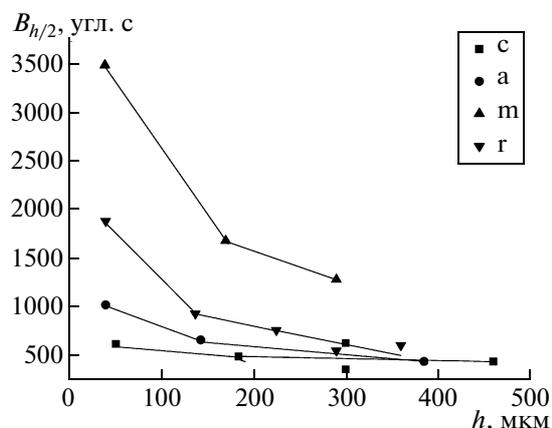


Рис. 5. Зависимость полуширины кривой дифракционного отражения от толщины слоя GaN, выращенного на подложках сапфира различной ориентации.

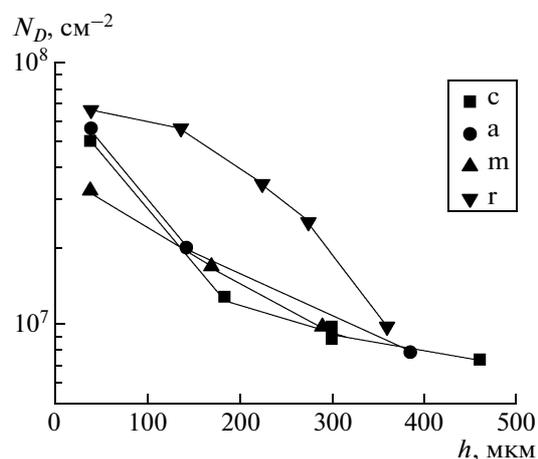


Рис. 6. Зависимость плотности дислокаций от толщины слоя GaN, выращенного на подложках сапфира различной ориентации.

ванных подложках, представлена на рис. 6. Как следует из данных, представленных на рис. 6, плотность дислокаций в эпитаксиальных слоях GaN уменьшается с увеличением толщины слоя независимо от ориентации поверхности слоя. В

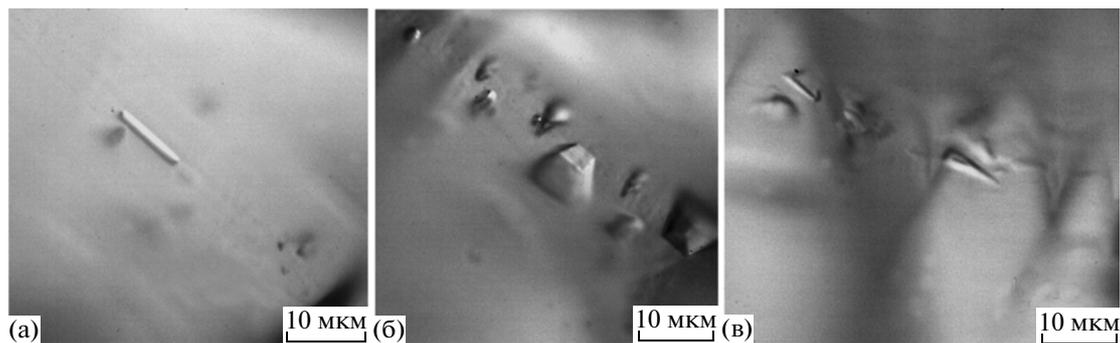


Рис. 7. Различная форма дефектов упаковки, выявляемая в эпитаксиальных слоях ориентации $(11\bar{2}0)$.

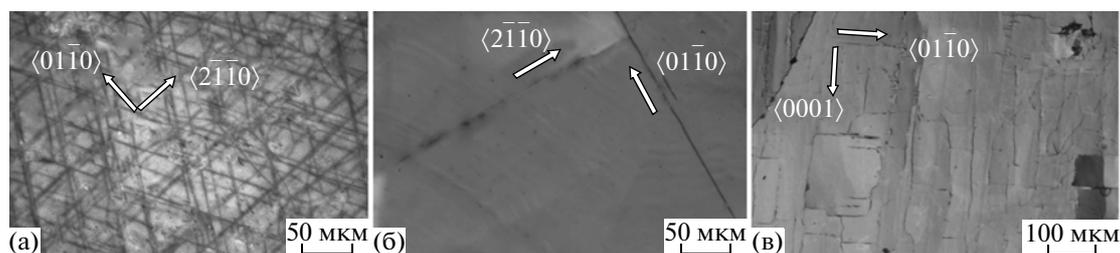


Рис. 8. Трещины в слоях GaN с различной ориентацией: (0001) (с-подложка) (а), (0001) (а-подложка) (б), $(11\bar{2}0)$ (в).

толстых слоях ($h \sim 400$ мкм) плотность дислокаций находится на одном уровне $\sim 1.0 \times 10^7$ см $^{-2}$. В тонких слоях (~ 30 мкм) плотность дислокаций находится на уровне $5\text{--}7 \times 10^7$ см $^{-2}$, за исключением слоя GaN ориентации $(10\bar{1}3)$, в котором плотность дислокации значительно меньше и составляет всего $\sim 2.3 \times 10^7$ см $^{-2}$.

Помимо дислокационных ямок при травлении эпитаксиальных слоев ориентации $(11\bar{2}0)$ и $(10\bar{1}3)$, выявляются дефекты упаковки. Подсчет

линейной плотности дефектов упаковки показывает, что в слоях $(10\bar{1}3)$ ориентации эта величина составляет в среднем 5×10^4 см $^{-1}$ и не зависит от толщины слоя. В слоях $(11\bar{2}0)$ ориентации максимальная величина линейной плотности дефектов упаковки составляет $\sim 2 \times 10^4$ см $^{-1}$ и она сильно меняется от структуры к структуре в интервале величин $2 \times 10^3 \text{--} 2 \times 10^4$ см $^{-1}$. Кроме этого, наблюдается неоднородное распределение дефектов упаковки по площади эпитаксиальных слоев, выращенных на подложках этих двух ориентаций. При этом в некоторых областях выявляются только дислокационные ямки травления, а в некоторых — только дефекты упаковки.

В эпитаксиальных слоях ориентации $(11\bar{2}0)$ выявляется различная форма дефектов упаковки, что хорошо видно на рис. 7. В эпитаксиальных слоях ориентации $(10\bar{1}3)$ дефекты упаковки всегда выявляются в виде прямых линий. В слоях ориентации $(11\bar{2}0)$, по мнению авторов работ [10, 11], образуются призматические и базовые дефекты упаковки. Пока нет единого мнения о типе дефектов упаковки, образующихся в слоях $(10\bar{1}3)$ ориентации. Одни авторы утверждают, что в слоях GaN образуются дефекты упаковки, залегающие в призматических плоскостях [9], а другие, что дефекты упаковки залегают в базовых плоскостях [12].

Так как в слоях GaN при выращивании на сапфире возникают большие напряжения, связан-

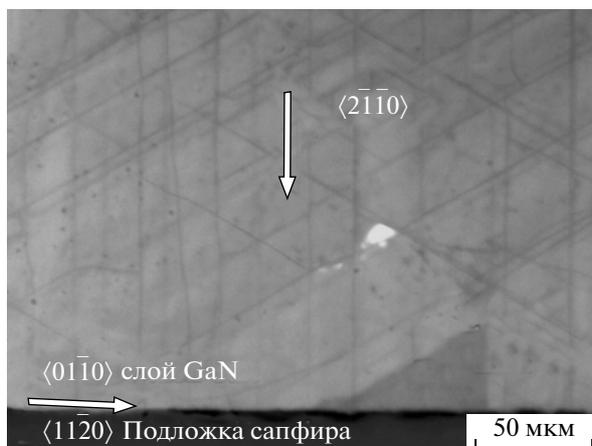


Рис. 9. Взаимное расположение направлений трещин в слое GaN, выращенном на подложке с-ориентации, с направлением скола всей структуры.

Таблица 2. Кристаллографическая ориентация различных морфологических дефектов, наблюдаемых на поверхности слоев GaN различной ориентации

Ориентация поверхности (<i>hkl</i>)	(0001)	(11 $\bar{2}$ 0)	(10 $\bar{1}$ 3)
Террасы: Распространение террас Направление террас	$\langle 0\bar{1}10 \rangle$ $\langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$	Нет террас	Проекции направлений $\langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ и $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ Проекции направлений $\langle 01\bar{1}0 \rangle$ и $\langle 1\bar{1}00 \rangle$
Ямы роста: Направление ребра	$\langle 01\bar{1}0 \rangle$	Нет ям	Проекции направлений $\langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ и $\langle 11\bar{2}0 \rangle$
Трещины: Направление	$\langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ и $\langle 01\bar{1}0 \rangle$	$\langle 1\bar{1}00 \rangle$ и $\langle 0001 \rangle$	
Дефекты упаковки Направление полосчатого рельефа	Нет дефектов упаковки	$\langle 0001 \rangle$	$\langle \bar{1}2\bar{1}0 \rangle$

ные с несоответствием параметров решетки и коэффициентов термического расширения слоя и подложки, то при охлаждении структуры в слоях GaN образуются трещины. В слоях GaN, ориентированных по плоскости (0001), образуется треугольная сетка трещин, идущих вдоль направления $\langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$ (рис. 8а). Также наблюдаются трещины, идущие вдоль направления $\langle 01\bar{1}0 \rangle$.

Согласно данным [13], трещины в слоях, ориентированных по плоскости (0001), идут параллельно плоскостям $\{10\bar{1}0\}$ слоя. Как показано на рис. 9, микротрещины в слое идут по направлению, перпендикулярному линии скола всей структуры. Если слой значительно тоньше, чем подложка, то вся структура растрескается по плоскостям, определяемым кристаллографией подложки, а не слоя: для сапфира ориентации (0001) трещины на поверхности идут вдоль направления $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ подложки, которое совпадает с направлением $\langle 01\bar{1}0 \rangle$ слоя.

В структурах слоев GaN ориентации (0001), выращенных на подложках а-ориентации, также наблюдаются трещины, идущие по этим двум направлениям, однако доля трещин, идущих вдоль направления $\langle 0\bar{1}10 \rangle$, возрастает (рис. 8б). В слоях GaN, ориентированных по плоскости (11 $\bar{2}$ 0), наблюдается почти ортогональная система трещин, идущих по направлениям $\langle 1\bar{1}00 \rangle$ и $\langle 0001 \rangle$ (рис. 8в).

Все полученные данные по кристаллографическим направлениям различных морфологических дефектов сведены в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана тесная связь геометрии морфологических дефектов, образующихся на поверхности слоя в процессе хлоридно-гидридной эпитаксии с

ориентацией поверхности слоев GaN. Обнаружено, что в зависимости от ориентации поверхности слоя GaN одни и те же дефекты, такие как террасы и ямы роста, ограничиваются различными плоскостями, линии пересечения которых с поверхностью роста идут по различным направлениям. Однако направления террас всегда перпендикулярны направлению граней ям роста. Показано, что направления трещин также зависят от ориентации поверхности слоя.

С ростом толщины слоев GaN, выращенных на подложках сапфира, всех исследованных ориентаций, их структурное совершенство, оцениваемое по величине полуширины КДО и плотности дислокаций, существенно улучшается. При малых толщинах выращенных слоев совершенство структуры падает в ряду ориентации слоев (0001), (11 $\bar{2}$ 0) и (10 $\bar{1}$ 3). При больших толщинах (свыше 200 мкм) слои ориентации (0001), выращенные на подложках с- и а-ориентации, имеют практически одинаковое совершенство структуры. Близкие к ним значения полуширины КДО имели и слои неполярного GaN ориентации (11 $\bar{2}$ 0). Значительно хуже реальная структура слоев с частично полярной ориентацией (10 $\bar{1}$ 3). При толщине слоя в несколько сотен мкм плотность дислокаций приближается к значениям $1 \times 10^7 \text{ см}^{-2}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu L., Edgar J.H. // Mater. Sci. Eng. 2002. V. 37. P. 61.
2. Zhu T., Martin D., Butte R. et al. // J. Cryst. Growth. 2007. V. 300. P. 186.
3. Haskel B.A., McLaurin M.B., Den Baars S.P. et al. // United States Patent -2007- #US7, 208, 393.
4. Дьяконов Л.И., Козлова Ю.П., Марков А.В. и др. // Изв. вузов. Материалы электронной техники. 2008. № 1. С. 47.

5. *Zauner A.R.A., Aret E., Enckeyort W.J.P.* // J. Cryst. Growth. 2002. V. 240. P. 14.
6. *Paskova T., Goldys E.M., Monemar B.* // J. Cryst. Growth. 1991. V. 200. P. 1.
7. *Jasinski J., Liliental-Weber Z.* // J. Electron. Mater. 2002. V. 31. P. 429.
8. *Monemar B., Larsson H., Hemmingson C. et al.* // J. Cryst. Growth. 2005. V. 281. P. 17.
9. *Wei T., Duan R., Wang J. et al.* // Jpn. J. Appl. Phys. 2008. V. 47. P. 3346.
10. *Mei J., Srinivasan S., Liu R. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. P. 141912
11. *Liu R., Bell A., Ponce F.A. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 86. P. 021908
12. *Cho Y.S., San Q., Lee I.H. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. P. 111904
13. *Etzkorn E.V., Clarke D.V.* // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. P. 1025.