

УДК 621.315.592:539.23

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ПОДЛОЖЕК SiC НА СТРУКТУРНОЕ СОВЕРШЕНСТВО И НЕКОТОРЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛЕНОК AlGaIn/GaN

© 2015 г. К. Л. Енишерлова, Т. Ф. Русак, В. И. Корнеев, А. Н. Зазулина

ОАО «НПП» Пульсар»,
Окружной проезд, д. 27, Москва, 105187, Россия

Дан анализ влияния объемных и поверхностных дефектов подложек SiC на структуру и некоторые электрофизические параметры выращенных на них эпитаксиальных слоев AlGaIn/GaN нитридных гетероструктур. В подложках из карбида кремния обнаружено наличие областей с внутренними напряжениями, источниками которых, как правило, являются пластинчатые включения, обогащенные углеродом. Экспериментально показано, что наличие внутренних напряжений в SiC может влиять на микрорельеф эпитаксиальных пленок в областях над напряженными участками. Установлено, что в областях эпитаксиальных пленок, выращенных над областями с внутренними напряжениями в объеме подложек SiC, наблюдается резкое ухудшение электрических параметров. В слоях AlGaIn/GaN обнаружено наличие ряда примесей, попадающих в них в процессе эпитаксии.

Ключевые слова: эпитаксиальные слои, нитридные гетероструктуры, пластинчатые включения, примесь.

Введение

Монокристаллический карбид кремния является наиболее перспективным по сравнению с сапфиром и кремнием подложечным материалом для выращивания эпитаксиальных слоев гетероструктур AlGaIn/GaN, особенно для силовой микроэлектроники. Это связано с высокой термической проводимостью, великолепными изолирующими свойствами и наличием хорошего соответствия параметров решетки SiC и GaN в базовых кристаллографических плоскостях. Ведущие мировые фирмы, занимающие лидирующие позиции на мировом рынке в секторе силовых приборов, уже давно обратили серьезное внимание на этот материал. В частности, компания Cree Inc. определила свое базовое направление как разработка и производство полупроводниковых приборов на основе SiC. В настоящее время она стала мировым лидером в производстве монокристаллических подложек из карбида кремния и эпитаксиальных структур на подложках из этого материала [1]. На данном этапе ведущими мировыми фирмами уже начат массовый выпуск НЕМТ–транзисторов, характеризующихся высокими значениями быстродействия, на SiC–подложках [2].

Качество подложек из SiC в значительной степени определяется свойствами слитков, которые пока нельзя считать совершенными. И это несмотря на то, что, начиная с 2006 г., только в Европе было запущено несколько интернациональных проектов по совершенствованию производства монокристаллического SiC диаметром 76–100 мм 4Н–политипа с улучшенными свойствами [3, 4].

Обычно для эпитаксиального роста гетероструктур AlGaIn/GaN используют монокристаллический SiC, выращенный в направлении [0001] с решеткой 4Н– или 6Н–политипа. Каждый политип характеризуется чередующимся набором одинаковых пар слоев Si–C. Эти слои развернуты относительно горизонтальной оси и оси с таким образом, что в каждом политипе они образуют как кубическую, так и гексагональную плотноупакованную решетку с определенными соотношениями между ними [5]. Поэтому параметр решетки a у всех политипов практически одинаков. Хотя параметр c , определяющий период идентичности, для разных политипов различен, часто при росте слитка одной политипной модификации образуются области другой модификации. Иногда политипные модификации последовательно вытесняют друг друга по всей по-

верхности роста, приводя к возникновению так называемых сэндвич-структур [6].

Установлено, что политипные включения являются одной из причин возникновения доменов в растущем слитке. Однако чаще возникновение доменов связано с винтовым дислокационным механизмом роста при наличии множества независимых центров зарождения. Границы доменов обычно представляют собой малоугловые наклонные границы. При этом разориентации соседних доменов, связанные с поворотами обычно вокруг оси [0001], по данным рентгеновского дифракционного анализа, не превышают 2–8°. На периферических областях может наблюдаться блочная структура с разворотом блоков до 40°. В слитках карбида кремния наблюдаются и другие виды структурных дефектов: микропоры, винтовые, краевые и смешанные дислокации, углеродные и другие включения. Наиболее серьезным дефектом, приводящим к фатальным последствиям при работе силовых приборов на основе SiC, считают микропоры — протяженные дефекты, вытянутые вдоль направления [0001], с полый областью ядра. В растущем кристалле карбида кремния могут возникать локальные механические напряжения вследствие наличия больших температурных градиентов, неоднородной фиксации затравки, появления политипных и других включений [7]. В последние два года достигнуты определенные успехи в получении монокристаллов SiC большого диаметра (до 150 мм) 4H- и 6H-политипов, в которых за счет оптимизации ростовых параметров значительно улучшено монокристаллическое совершенство материала [8].

Однако данные о том, как именно влияют перечисленные выше особенности и нарушения структуры карбида кремния на качество эпитаксиальной пленки, по существу, отсутствуют. Проблемы механической обработки пластин из карбида кремния также в настоящее время не до конца решены и в большинстве случаев являются секретом фирм, продающих такие подложки.

Уменьшение количества дефектов, связанных с несоответствием параметров решетки SiC и GaN обеспечивается тем, что при определенной концентрации Al в слое AlGaN зародышевые ячейки структуры AlGaN по оси с будут близки к атомарным ступенькам вицинальной поверхности SiC. По параметру a SiC (0,308 нм) ближе к AlN (0,311 нм), чем к GaN (0,3189 нм). Это позволяет вырастить на поверхности SiC в качестве зародышевых слоев AlN и AlGaN переменного состава, подобранные следующим образом.

1. Максимально приблизить параметры решеток подложки и пленки.
2. Свести к минимуму упругие напряжения, возникающие из-за рассогласования решеток.
3. Свести к минимуму плотность ростовых дислокаций, возникающих в результате релаксации напряжений.

Поверхности SiC практически не смачиваются GaN. Поэтому зародышевый слой AlN выступает в качестве хорошего смачивающего агента.

В некоторых работах сообщается о возможности диффузии примесей в GaN из подложки, в частности кислорода из сапфировой подложки [9] и кремния из подложки карбида кремния [10].

На данном этапе в РФ используют в основном подложки из этого материала, поставляемые зарубежными фирмами. Поэтому целью работы была оценка принципиальной возможности присутствия в подложках, на которых изготовлены поступающие в производство структуры, перечисленных выше дефектов, рассмотрение механизма их влияния на структурное совершенство и некоторые электрофизические параметры эпитаксиальных слоев.

Образцы и методика исследования

Для анализа была выбрана наиболее распространенная конструкция гетероструктур AlGaIn/GaN — классические однопереходные гетероструктуры [9]. Такая конструкция гетероструктур широко используется в мире для изготовления НЕМТ СВЧ-транзисторов. Она включает относительно толстый (2–3 мкм) буферный слой GaN и тонкий (10–25 нм) слой $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{N}$ с содержанием алюминия $x = 0,26 \pm 0,3$.

Анализировали гетероструктуры AlGaIn/GaN диаметром 53 мм, выращенные методом MOCVD как отечественными, так и западными фирмами на подложках SiC с толщиной барьерного слоя 200 нм. Как правило, это были дополнительно нелегированные гетероструктуры с нелегированными верхними слоями $i\text{-AlGaIn}$ и $i\text{-GaN}$ толщиной 2,0–2,5 нм. Образцы были ориентированы в направлении [0001] без дополнительного поворота. В этом случае следует ожидать более существенного влияния погрешностей ориентации и макрорельефа на морфологию поверхности и однородность эпитаксиальной пленки.

Макроскопическую картину распределения полей упругих напряжений в объеме подложек наблюдали на макете установки экспресс-контроля в поляризованном свете, разработанной в ОАО «НПП «Пульсар» [10]. На экран выведена картина распределения упругих напряжений по всей площади пластины. Более подробное исследование областей с упругими напряжениями проводили на оптическом микроскопе с использованием контраста по Номарскому.

Состав наблюдаемых включений анализировали на растровом электронном микроскопе серии CAMSCAN-S4 с помощью рентгеновской приставки INCAENERGY. Исследования проводили при ускоряющем напряжении 20 кэВ. Для исключения зарядки поверхности образцов под электронным лучом на поверхность ряда образцов напыляли слой золота.

Нарушения структуры в слое GaN исследовали методом селективного травления в ортофосфорной кислоте при температуре 200 °С. Подложки карбида кремния травили в расплаве KOH при 500 °С. Для изучения распределения плотности дислокаций по глубине эпитаксиальных слоев использовали специальную методику, включающую последовательное сочетание процессов плазменного полирующего травления при фиксации глубины удаленного слоя с последующим селективным химическим травлением.

Для изучения распределения дислокационных скоплений по диаметру эпитаксиальных слоев использовали разработанный метод локального точечного травления.

Для оценки влияния структурных нарушений на электрические параметры снимали ВЧ $C-V$ - и $V-I$ -характеристики барьера Шоттки: ртутный зонд — поверхность гетероструктуры. Измерения проводили при $T_{ком}$ на установке Semiconductor Measurement Sistem MDC CSM/Win с помощью ртутного зонда площадью $0,005 \text{ см}^2$ при планарном расположении зонда и второго электрода на анализируемой поверхности. Использование ртутного зонда позволяет проводить измерения непосредственно на выращен-

ных структурах, исследовать и сравнивать разные области структуры.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показаны наиболее характерные картины распределения размеров и расположения напряженных областей на площади структур (а) и наиболее напряженные участки, наблюдаемые в поле зрения микроскопа с контрастом по Номарскому (б). Наблюдаются контрастные или размытые полосы и локальные розетки напряжений с ярким черно-белым контрастом. В таблице приведены результаты электрофизических измерений, которые показали следующее:

- наличие даже очень крупных областей с внутренними напряжениями практически никак не сказывается на результатах измерений методом Холла;
- на областях с внутренними напряжениями наблюдается резкое возрастание тока утечки (обратная ветвь вольт-амперной характеристики);
- наличие областей с внутренними напряжениями приводит к более сильному сдвигу напряжения отсечки $U_{отс}$ в область отрицательных значений и

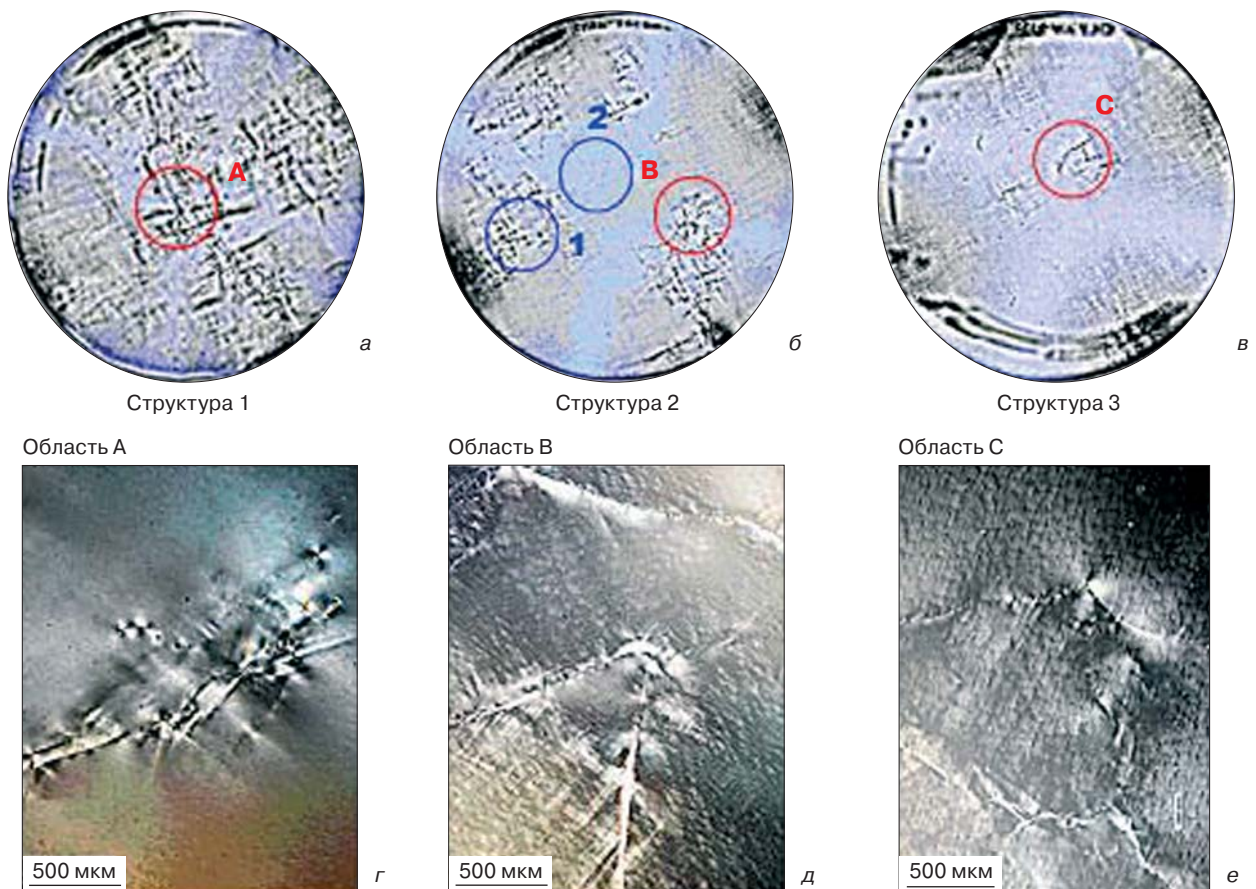


Рис. 1. Наиболее характерные картины распределения полей упругих напряжений в гетероструктурах: а–в — макрофотографическая картина распределения полей упругих напряжений в объеме гетероструктур; г–е — наблюдение локальных областей гетероструктур в поле зрения микроскопа с контрастом по Номарскому

Fig. 1. Typical Distributions of Elastic Stress Fields in Heterostructures: (a–b) Macroimage of Elastic Stress Field Distribution in Heterostructure Bulk; (c–e) Local Heterostructure Region Images in Nomarsky Contrast

Электрофизические параметры исследованных гетероструктур AlGaIn/GaN
[Electrophysical Parameters of Test AlGaIn/GaN Heterostructures]

Структура	Измерения методом Холла			C—V-измерения		V—I-измерения
	Подвижность μ , см ² /В·с	Концентрация носителей заряда, см ⁻²	Слоевое сопротивление, Ом/кв.	C _{max} , пФ	Напряжение отсечки, В	Обратные токи, А
1	2070	$1,35 \cdot 10^{13}$	224	1450—1550	-6,5 ... -7	$3 \cdot 10^{-4}$ — $1,5 \cdot 10^{-3}$
2	2070	$1,3 \cdot 10^{13}$	228	1300—1400	-7 ... -8	$5 \cdot 10^{-4}$ (обл. 1) — $1 \cdot 10^{-3}$ (обл. 2)
3	2080	$1,3 \cdot 10^{13}$	227	1300—1330	-4,3 ... -4,5	$2 \cdot 10^{-10}$ — $1 \cdot 10^{-8}$

к росту C_{\min} при измерении на более низких частотах (100—1000 Гц). Кроме того, для гетероструктур с областями внутренних напряжений характерен существенный разброс значений электрических параметров.

Отсутствие чувствительности измерений, выполненных методом Холла, к наличию напряженных областей связано скорее всего с тем, что, согласно принятой методике, измерения значений подвижности и концентрации носителей заряда в канале являются усредненными для всей гетероструктуры.

C—V- и V—I-измерения проводят локально в определенных участках структуры. Это позволяет получить статистически значимую связь исследуемых параметров с напряженными областями. Локальный рост токов утечки и рост значения C_{\min} при низких частотах, возможно, свидетельствуют о наличии паразитных каналов в буферном слое GaN и на границе AlGaIn—GaN. Сдвиг напряжения отсечки в область отрицательных значений свидетельствует о наличии положительного заряда в барьерном слое над областями с упругими напряжениями.

Подобные нарушения электрофизических параметров могут быть вызваны как наследованием упругих деформаций в растущем слое GaN, так и изменением системы ростовых нарушений структуры эпитаксиальной пленки.

Непосредственное влияние упругих деформаций может быть связано с взаимодействием полей упругих напряжений с макроскопической картиной поляризации, возникающей на гетерогранице нитридных соединений. Созданное макроскопической поляризацией электрическое поле вызывает ограниченное движение электронов в одном направлении и способствует образованию двумерного электронного газа [11]. В отсутствие внешних полей общая макроскопическая поляризация определяется суммой спонтанной поляризации равновесной структуры и пьезоэлектрической поляризацией, вызванной деформацией на гетерогранице. Расчеты, проведенные авторами, показали, что пьезоэлектрическая поляризация совпадает по знаку со спонтанной поляризацией. Это приводит к увеличению макроскопической поляризации.

Показанные в таблице картины распределения полей упругих напряжений, отличающиеся существенной неоднородностью, формируются в объеме

подложки. Однако при эпитаксиальном росте GaN на SiC упругая деформация связей атомов поверхности SiC воспринимается растущей пленкой. Наследуемая пленкой область неравномерного распределения напряжений нарушает равномерность макроскопической поляризации. Это, вероятно, и является причиной ухудшения и разброса значений электрофизических параметров в структурах с явно выраженными напряженными участками.

Наличие напряженных участков в подложке и пленке может приводить также к преимущественному перераспределению и накоплению в напряженных областях примесей, попадающих в растущую эпитаксиальную пленку. Это подтверждается исследованием поверхностного слоя напряженных участков структур с использованием сканирующего электронного микроскопа с рентгеновской приставкой (рис. 2, третья стр. обложки). В области с резко выраженной концентрацией напряжений обнаружено присутствие ряда случайных элементов, а на поверхности SiC после полного удаления GaN — только кислород из-за окисления поверхности SiC.

Для установления связи между наблюдаемой картиной напряженного состояния и формированием дефектов в растущей пленке проводили последовательное травление слоя GaN в ортофосфорной кислоте при 200 °С. Так как травление проводили капельным методом, то объем травителя и время травления подбирали отдельно для каждого эксперимента.

На рис. 3 (третья стр. обложки) показаны результаты последовательного травления напряженной области. После первого кратковременного этапа травления при включенных поляроидах четко проявляются в виде круглых фигур травления узловые точки, на которых до травления наблюдались розетки напряжений (см. рис. 3, а).

После второго этапа травления (фото с выключенными поляроидами) наблюдается в целом равномерный характер распределения дислокаций (см. рис. 3, б). Так как после первых двух этапов травления был снят слой не более 0,1 мкм, то картина на рис. 3, б характеризует распределение дислокаций в самой верхней части слоя GaN, непосредственно вблизи рабочей зоны AlGaIn.

В областях с максимальной концентрацией напряжений слой GaN протравливается до подложки.

ки SiC с образованием слегка ограненной фигуры травления. Вокруг таких фигур травления, а также в некоторых других областях (например, I, II, III) наблюдаются дугообразные скопления дислокаций (см. рис. 3, б). Дальнейшее травление приводит к быстрому разрастанию таких фигур травления при очень маленькой скорости травления слоя GaN в вертикальном направлении (см. рис. 3, в). Общая картина распределения напряжений практически не меняется, но выглядит не так отчетливо из-за массы дислокационных ямок травления. На поверхности SiC внутри наиболее крупных фигур травления наблюдаются мелкие черные включения пластинчатой формы (см. рис. 3, г). Анализ состава элементов в областях с такими включениями показал наличие кремния и углерода. Причем количество углерода существенно больше ожидаемого в соответствии со стехиометрическим составом. Кроме кислорода, неизбежно наблюдаемого при окислении поверхности SiC, другие примеси не обнаружены, что подтверждает чисто углеродный состав таких включений.

При разных позициях поворота поляроидов можно наблюдать, что эти включения являются мощными центрами концентрации напряжений (см. рис. 3, в).

Из рис. 3 видно, что при длительном травлении растущие фигуры травления на дислокациях препятствуют дальнейшему наблюдению. Для анализа дислокационной картины в более глубоких слоях GaN с поверхности структуры плазменным полирующим травлением удаляли слой GaN толщиной 1,5—2 мкм, затем провели последовательное травление поверхности в ортофосфорной кислоте. Наблюдение за трансформацией отдельных фигур травления позволяет предложить схему последовательности растворения слоя, а значит, и последовательности роста эпитаксиальной пленки (рис. 4, см. четвертую стр. обложки).

После кратковременного селективного травления наблюдаются фигуры травления в виде шестигранных пирамид с острыми вершинами (см. рис. 4, а). Плотность дислокаций практически такая же, как в самом верхнем слое (см. рис. 4, а). При следующих этапах травления формируются плоскодонные шестиугольные ямки глубиной менее 0,1 мкм. Затем увеличиваются размеры и уменьшается глубина фигур травления с постепенным их полным растворением (см. рис. 4, б). Плотность дислокаций в самом нижнем слое резко уменьшается (см. рис. 4, в). Размер самых крупных фигур травления, дно которых достигло подложки, резко увеличивается. В их центре часто наблюдаются углеродные включения, показанные на рис. 3 (см. третью стр. обложки).

Из этих наблюдений следует, что удаление материала идет слоями. Каждая вновь образовавшаяся ямка доходит до следующего слоя и начинает расти в ширину, постепенно растворяясь, пока не удалится весь слой. Последними растворяются области вокруг

фигур травления, дно которых достигло подложки в первые минуты травления. На рис. 4, в показано, что вблизи них толщина не удаленного слоя больше, чем на остальной поверхности. Можно предположить, что рост слоя идет в обратной последовательности. По винтовому механизму растут крупные блоки с достаточно совершенной структурой. Когда первичные блоки начинают сливаться, дефекты, образующиеся на границе блоков из-за неидеального соответствия решеток, становятся центрами зарождения новых слоев. Структура этих новых слоев менее совершенна, чем слой, состоящий из первичных блоков, что соответствует данным рис. 4, а—в.

Из такого предположения о последовательности роста следует, что дислокационная структура верхнего рабочего слоя GaN не связана с подложкой, а определяется условиями роста последних слоев. В то же время как высота и однородность рельефа пленки в значительной степени определяются размерами первичных блоков, растущих непосредственно на подложке.

С целью уточнения роли нарушений структуры в карбиде кремния при формировании эпитаксиальной пленки проводили травление поверхности SiC (рис. 5, см. четвертую стр. обложки) после удаления слоя GaN на том же участке структуры, который показан на рис. 3, в расплаве KOH при 500 °С. Обычно травление SiC проводят при температуре не менее 600 °С. Однако при высокотемпературном травлении SiC скорость травления материала вблизи каких-либо включений намного больше, чем на остальной поверхности. Таким образом, имеется опасность полного вытравливания включений. Фигуры травления, наблюдаемые после ориентированного травления образовавшихся в результате этого полостей, точно соответствуют фигурам травления на микропорах, приведенным, например, в работе [7]. По таким фигурам травления невозможно точно определить первоначальную причину их образования: микропоры или включения. Медленное травление при 500 °С позволяет сохранить углеродные включения. Сравнение рис. 3, а и 5, а (третья и четвертая стр. обложки соответственно) показало, что удаление слоя GaN не изменяет картину напряженного состояния. На поверхности карбида кремния после травления выявляются фигуры травления как единичные, неравномерно распределенные, так и образующие малоугловые границы, разделяющие домены. Прямая связь между фигурами травления на поверхности карбида кремния и в слое GaN даже после длительного травления не существенна. Это обусловлено тем, что плотность дислокаций в карбиде кремния (10^2 — 10^3 см⁻²) на 2—3 порядка меньше, чем плотность дислокаций в GaN. В тех областях, где напряжения отсутствуют (область А), наблюдаются два вида фигур травления, образующих малоугловые границы: более крупные темные шестигранные ямки и слабовыраженные, более мелкие треугольные ямки.

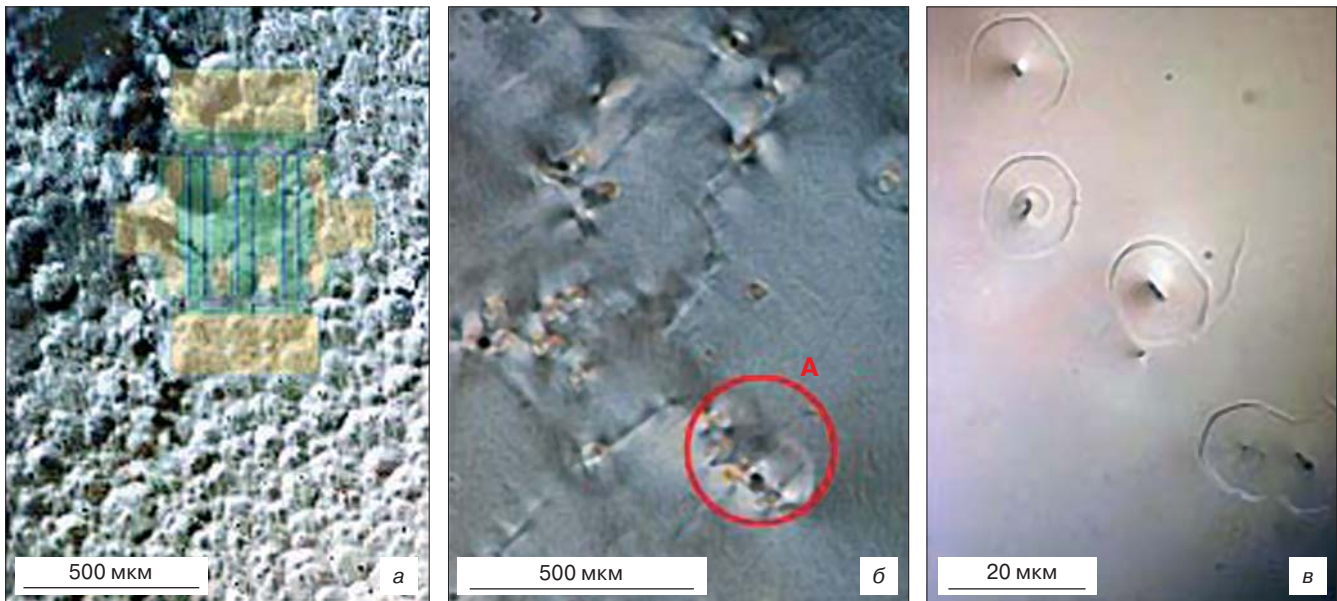


Рис. 6. Особенности рельефа поверхности на областях с упругими напряжениями:
 а — соотношение между крупными фрагментами рельефа поверхности и контурами прибора; б, в — наличие углеродных включений в центре наиболее крупных выступов рельефа

Fig. 6. Surface Features in Elastically Stressed Regions:
 (a) Comparison of Large Surface Features and Device Fragments; (б and в) Carbon Inclusions in the Center of Largest Surface Features

Согласно классификации, предложенной в работе [7], — это микропоры и дислокации с краевой компонентой соответственно. В напряженных областях (область Б) вместо шестиугольных фигур травления наблюдаются углеродные включения, которые и являются концентраторами напряжений. Микропоры считаются наиболее опасным видом дефектов при использовании эпитаксиальных структур для изготовления приборов. Эта опасность проявляется в том, что в части микропор формируются углеродные включения, образующие напряженные участки большой площади.

Из предложенной схемы роста эпитаксиальной пленки следует, что чем больше размер блоков в плоскости приборов, тем больше их высота. Следовательно, рост крупных блоков в местах образования включений и концентрации напряжений приводит к увеличению размеров и высоты рельефа в напряженных областях. Измерения на профилографе показали, что в ненапряженных областях высота рельефа не превышает толщины рабочего слоя AlGaIn (20 нм), а в напряженных областях наблюдаются выступы до 50—60 нм (рис. 6, 7). Это существенно превышает толщину рабочего слоя и может приводить

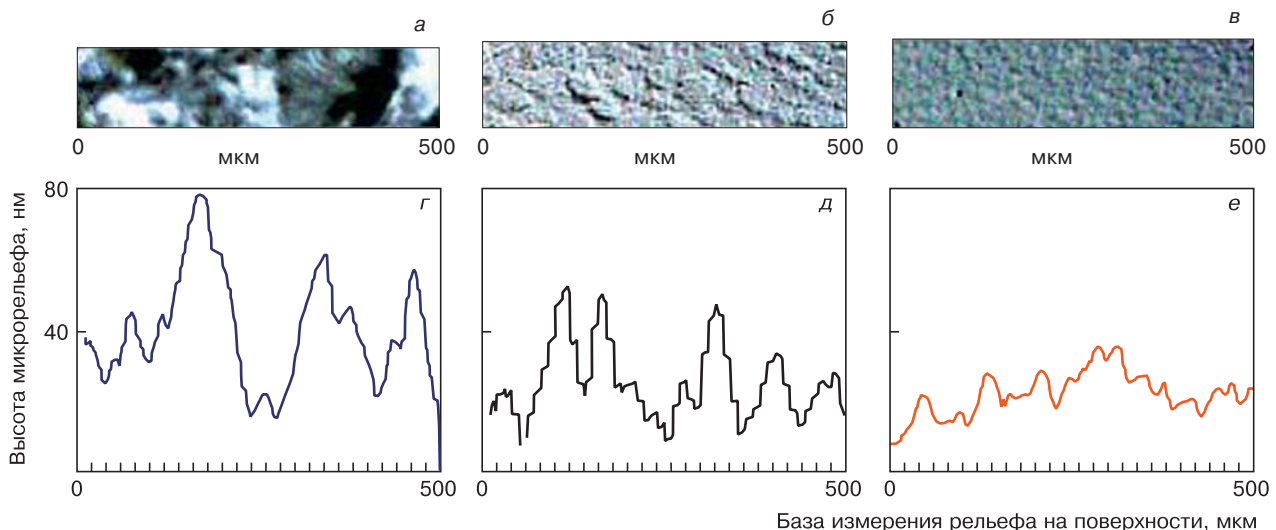


Рис. 7. Сравнение рельефа различных участков поверхности (а—в) и соответствующих им профилограмм (г—е) для структуры AlGaIn на SiC (а, б, г, д) и AlGaIn на Al₂O₃ (в, е):
 а, г — напряженные участки; б, в, д, е — участки, свободные от напряжений

Fig. 7. Comparison of (a—в) Surface Features for Different Surface Regions and (г—е) Respective Profilograms for (а, б, г and д) AlGaIn Structure on SiC and (в and е) AlGaIn Structure on Al₂O₃: (а and г) Stressed Regions and (б, в, д and е) Stress Free Regions

к его неоднородности и ухудшению его структурного совершенства.

Заключение

Экспериментально показано, что наличие областей с упругими напряжениями в объеме подложки SiC приводит к резкому ухудшению параметров эпитаксиальных пленок AlGaN/GaN, выращенных на таких подложках: росту токов утечки, сдвигу напряжения отсечки в область отрицательных смещений, разбросу параметров.

Установлено, что концентраторами напряжений, создающими картину упругих напряжений, являются пластинчатые включения размером до 5 мкм, обогащенные углеродом. Эти включения могут быть расположены как вдоль малоугловых границ, так и независимо от них.

Дислокационная структура SiC напрямую не определяет плотность и распределение дислокаций в верхнем слое GaN ($5 \cdot 10^5$ — 10^6 см⁻²). Плотность дислокаций в SiC вне малоугловых границ составляет 10^2 — 10^3 см⁻².

В эпитаксиальной пленке обнаружены примеси, не соответствующие стехиометрическому составу многослойной структуры, которые попадают в пленку в процессе ее роста.

Экспериментально показано, что на включениях, являющихся центрами максимальной концентрации напряжений в SiC, при эпитаксиальном росте создаются условия для преимущественного роста крупных зародышевых блоков, что приводит к изменению морфологии поверхности. Высота микрорельефа в напряженных областях может значительно превышать толщину рабочего слоя AlGaN/GaN. Это может приводить к его неоднородности, нарушению кристаллографического совершенства.

Библиографический список

1. **Курышева, Е.** Силовые приборы компании Cree на основе карбида кремния / Е. Курышева // Компоненты и технологии. – 2011. – № 6. – С. 106—110.
2. **Майская, В.** Компоненты беспроводной связи — миллиметровая волна / В. Майская // Электроника: НТБ. – 2011. – № 6 (00112). – С. 42—49.
3. **Loboda, M. J.** Advances in SiC substrates for power and energy applications / M. J. Loboda, G. Chung, E. Carlson, R. Drachev, D. Hansen, E. Sanchez, J. Wan, J. Zhang // CS Mantech Conf. – Palm Springs (CA, USA), 2011.
4. **Waltereit, P.** Development of an epitaxial growth process on European SiC substrates for a low leakage GaN HEMT technology with power added efficiencies around and 65 % / P. Waltereit, S. Muller, L. Kirste, M. Prescher, S. Storm, A. Weber, B. Schauwecker, M. Hosch, J. Spletstober // CS Mantech Conf. – Palm Springs (CA, USA), 2013. – P. 121—124.
5. **Данилин, В. Н.** Мощные высокотемпературные и радиационно-стойкие СВЧ-приборы нового поколения на широконзонных гетеропереходных структурах AlGaIn/GaN / В. Н. Данилин, Ю. П. Докучаев, Т. А. Жукова, М. А. Комаров // Электронная техника. Сер. 1: Электроника СВЧ. – 2001. – Вып. 1. – С. 137.
6. **Авров, Д. Д.** Образование доменов при синтаксическом срастании политипов карбида кремния / Д. Д. Авров, С. И. Дорожкин, А. О. Лебедев, Ю. М. Таиров // ФТП. – 2007. – Т. 41, вып. 12. – С. 1409—1413.
7. **Авров, Д. Д.** О механизмах образования дефектов в слитках карбида кремния политип 4H / Д. Д. Авров, А. В. Булатов, С. И. Дорожкин, А. О. Лебедев, Ю. М. Таиров, А. Ю. Фадеев // ФТП. – 2011. – Т. 45, вып. 3. – С. 289—294.
8. **Ruland, G.** Status of large diameter SiC single crystals / G. Ruland, P. Wu, X. Xu, V. Rengarajan, I. Zwieback, A. Gupta, M. Ramm // ECS Transaction. – 2014. – V. 64(7). – P. 27—33. DOI: 10.1149/06407.0027ecst
9. **Алексеев, А.** Многослойные гетероструктуры AlN/AlGaIn/GaN/AlGaIn — основа новой компонентной базы твердотельной СВЧ-электроники / А. Алексеев, Д. Красовицкий, С. Петров, В. Чалый // Компоненты и технологии. – 2008. – № 2. – С. 138.
10. **Гуськов, Б. Л.** Экспрессный метод контроля дефектов пластин SiC и гетероструктур AlGaIn/GaN/SiC / Б. Л. Гуськов, Ю. А. Концевой // Электрон. техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 2010. – Вып 2(225). – С. 69—70.
11. **Супрядкина, И. А.** Исследование поляризаций нитридных соединений (Al, Ga, AlGa)N и зарядовой плотности различных интерфейсов на их основе / И. А. Супрядкина, К. К. Абгарян, Д. И. Важанов, И. В. Мутигуллин // ФТП. – 2013. – Т. 47, вып. 12. – С. 1647—1652.

Статья поступила в редакцию 10 ноября 2015 г.

ISSN 1609–3577 Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronic Technics. 2015, vol. 18, no. 3, pp. 221–228.

Effect of SiC Substrate Properties on Structural Perfection and Electrical Parameters of AlGaIn/G Layers

Kira L. Enisherlova¹ — Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory (Enisherlova@pulsarnpp.ru); **Tatyana F. Rusak**¹ — Senior Researcher; **Vyacheslav I. Korneev**¹; **A. N. Zazulina**¹

¹JSC «S&PE «Pulsar»,
27 Okružhnoi proezd, Moscow 105187, Russia

Abstract. We have analyzed the effect of volume and surface defects SiC substrates on structure and some electrophysical parameters of AlGaIn/GaN epitaxial layer heterostructures grown on them. Regions with internal stresses usually induced by carbon rich disk-shaped inclusions were detected in the initial substrates. We show experimentally that the presence of internal stresses in SiC could affect the microroughness of epitaxial films in regions above stressed areas. Abrupt deterioration of electrophysical parameters was observed in regions of epitaxial films growing above areas with internal stresses in the substrate. AlGaIn/GaN layers contain impurities delivered to their bulk during epitaxy or preparatory operations.

Keywords: epitaxial layers, nitride heterostructures, disk-shaped inclusions, impurity.

References

1. Kuryshcheva E. Power equipment company Cree silicon carbide. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies*, 2011, no. 6, pp. 106—110. (In Russ.)
2. Maiskaya V. Wireless components — millimeter wave. *Elektronika: NTB*, 2011, no. 6 (00112), pp. 42—49. (In Russ.)
3. Loboda M. J., Chung G., Carlson E., Drachev R., Hansen D., Sanchez E., Wan J., Zhang J. Advances in SiC substrates for power and energy applications. *CS Mantech Conf.* Palm Springs (CA, USA), 2011.
4. Waltereit P., Muller S., Kirste L., Prescher M., Storm S., Weber A., Schauwecker B., Hosch M., Spletstober J. Development of an epitaxial growth process on European SiC substrates for a low leakage GaN HEMT technology with power added efficiencies around and 65 %. *CS Mantech Conf.* Palm Springs (CA, USA), 2013. Pp. 121—124.

5. Danilin V. N., Dokuchaev Yu. P., Zhukova T. A., Komarov M. A. Powerful high-temperature and a new generation of radiation-resistant microwave devices on wideband heterojunction structures of AlGaIn/GaN. *Elektronnaya Tekhnika. Series 1: Elektronika SVCh = Electronic Engineering. Ser. 1: Microwave Electronics*, 2001, no. 1, p. 137. (In Russ.)

6. Avrov D. D., Dorozhkin S. I., Lebedev A. O., Tairov Yu. M. On domain formation caused by syntaxy of silicon carbide polytypes. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Semiconductors*, 2007, vol. 41, no. 12, pp. 1409–1413. (In Russ.)

7. Avrov D. D., Bulatov A. V., Dorozhkin S. I., Lebedev A. O., Tairov Yu. M., Fadeev A. Yu. On the mechanisms of defect formation in 4H silicon carbide ingots. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Semiconductors*, 2011, vol. 45, no. 3, pp. 289–294. (In Russ.)

8. Ruland G., Wu P., Xu X., Rengarajan V., Zwieback I., Gupta A., Ramm M. Status of large diameter SiC single crystals. *ECS Transaction*, 2014, vol. 64(7), pp. 27–33. DOI: 10.1149/06407.0027ecst

9. Alekseev A., Krasovitskii D., Petrov S., Chalyi V. Multilayer heterostructures AlN/AlGaIn/GaN/AlGaIn — the foundation of a new component base of solid-state microwave electronics. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies*, 2008, no. 2, p. 138. (In Russ.)

10. Guskov B. L., Kontsevoi Yu. A. Rapid method of control defects SiC wafers and heterostructures AlGaIn/GaN/SiC. *Elektronnaya tekhnika. Series 2. Poluprovodnikovye pribory = Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices*, 2010, no. 2(225), pp. 69–70. (In Russ.)

11. Supryadkina I. A., Abgaryan K. K., Bazhanov D. I., Mutigullin I. V. Investigation of polarization of nitride compounds (Al,Ga,AlGaN) and charge density of their various interfaces. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Semiconductors*, 2013, vol. 47, no. 12, pp. 1647–1652. (In Russ.)

Received November 10, 2015

Оформление References

В связи с вхождением журнала в зарубежные базы цитирования научных публикаций помимо традиционного списка литературы (ГОСТ 7.0.5–2008) необходим дополнительный список с переводом русскоязычных источников на латиницу. Применяется транслитерация по системе BSI (см. <http://ru.translit.net/?account=bsi>)

Типовые примеры описаний в References

Статьи из журнала:

Author A. A., Author B. B., Author C. C. Title of article. Title of Journal, 2005, vol. 10, no. 2, pp. 49–53.

Авторы (транслитерация (<http://ru.translit.net/?account=bsi>) или как зарегистрированы в зарубежных базах данных), перевод названия статьи на английский язык, далее курсивом название журнала (транслитерация = перевод), год выхода издания, номер журнала, интервал страниц. (Нежелательно в ссылках делать произвольные сокращения названий источников).

Если описываемая публикация имеет DOI, его указание обязательно в References.

Если работа была издана и на русском и на английском (или других) языках, то в References лучше давать ссылку на первоисточник.

Асрян, Л. В. Теория пороговых характеристик полупроводниковых лазеров на квантовых точках / Л. В. Асрян, Р. А. Суриц // ФТП. – 2004. – Т. 38, № 1. – С. 3–25.

Asryan L. V., Suris R. A. Theory of threshold characteristics of semiconductor quantum dot lasers. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov = Semiconductors*. 2004, vol. 38, no. 1, pp. 3–25. (In Russ.)

Гаев, Д. С. Особенности получения островковых структур инконгруэнтным испарением / Д. С. Гаев, Л. М. Павлова, Г. Д. Кузнецов // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2006. – № 4. – С. 47–51.

Gaev D. S., Pavlova L. M., Kuznecov G. D. Method of synthesizing nanosized structures by incongruent evaporation of alloys. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2006, no. 4, pp. 47–51. (In Russ.)

Книги (монографии, сборники):

Author A. A., Author B. B., Author C. C. Nazvanie knigi [Title of book]. Gorod izdaniya: Izdatel'stvo, 2005. 280 p.

Авторы (транслитерация или как зарегистрированы в зарубежных базах данных), курсивом название книги в транслитерированном варианте (<http://ru.translit.net/?account=bsi>) [перевод

названия статьи на английский язык в квадратных скобках] (представление в References только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо), город издания, название издательства (транслитерация), год выхода издания, количество страниц.

Демиховский, В. Я. Физика квантовых низкоразмерных структур / В. Я. Демиховский, Г. А. Вугальтер. – М.: Логос, 2000. – 250 с.

Demikhovskii V. Ya., Vugal'ter G. A. *Fizika kvantovykh nizkorazmernykh struktur* [Physics of quantum low-dimensional structures]. Moscow: Logos, 2000. 250 p. (In Russ.)

Материалы конференций:

Кичик, С. А. Исследование механических и термоэлектрических свойств материалов $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$, полученных методом вакуумного прессования / С. А. Кичик, А. А. Мельников, И. С. Маракушев, А. Н. Корякин // XIII Межгосударственный семинар «Термоэлектрики и их применения». – С.-Пб, 2012. – С. 267–258.

Kichik S. A., Melnikov A. A., Marakushev I. S., Koryakin A. N. Investigation of mechanical and thermoelectric properties of $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ materials prepared by vacuum pressing. *XIII Mezhhgosudarstvennyi Seminar «Termoelektriki i ikh primeneniya» = XIII Interstate Workshop «Thermoelectrics and their applications»*. St. Petersburg, 2012, pp. 267–258 (In Russ.)

Патент:

Пат. 2175951 (РФ). Способ получения активного гидроксида алюминия / Ю. А. Лайнер, Л. М. Сурова, Г. И. Гашков, Г. И. Волфсон, 2000.

Patent 2175951 (RF). Sposob polucheniya aktivnogo gidroksida alyuminiya [A method of producing an active aluminum hydroxide]. Yu. A. Lainer, L. M. Surova, G. I. Gashkov, G. I. Vol'fson, 2000.

Диссертация или автореферат диссертации:

Филатова, Е. О. Спектроскопия зеркального отражения и рассеяния мягкого рентгеновского излучения поверхностями твердых тел: дисс. ... д-ра физ.-мат. н. – С.-Пб., 2000. – 374 с.

Filatova E. O. *Spektroskopiya zerkal'nogo otrazheniya i rasseyaniya myagkogo rentgenovskogo izlucheniya poverkhnostyami tverdykh tel*: diss. ... d-ra fiz.-mat. n. [Spectroscopy specular reflection and scattering of soft X-ray solid surfaces: diss. ... Dr. Sci. (Phys.-Math.)]. S.-Pb., 2000. 374 p. (In Russ.)

Интернет-ресурс:

Разработка рудных месторождений. URL: <http://www.starkmanrealtors.com/index.html> (дата обращения 01.10.2012).

Razrabotka rudnykh mestorozhdenii [The development of ore deposits]. URL: <http://www.starkmanrealtors.com/index.html> (accessed: 01.10.2012). (In Russ.)