

УДК 539.26:621.315.592:548.4

# ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОЙ ОДНОКРИСТАЛЬНОЙ ДИФРАКТОМЕТРИИ

© 2012 г. А. В. Лютцау, М. М. Крымко, К. Л. Енишерлова,  
Э. М. Темпер, И. И. Разгуляев  
Федеральное государственное предприятие  
«Научно-производственное предприятие «Пульсар»

Рассмотрены возможности использования дифрактометра XMD-300 при трех схемах съемки: скользящего первичного пучка, скользящего дифрагированного пучка, схемы  $\theta-2\theta$  для исследования кристаллического совершенства полупроводниковых гетероструктур (кремний-на-сапфире, кремний-на-изоляторе, ионно-легированные слои кремния, структуры AlGaIn/GaN/Si). Показано, что измерения с использованием трех схем в рассеянном излучении и при точном соблюдении условия брегговской дифракции позволяют получить интерференционную картину дифракции одновременно от кристаллических решеток нескольких слоев гетероструктуры и интерференционные пики максимальной интенсивности для каждого отдельного слоя.

**Ключевые слова:** КНС-структуры, тестовые МДП-структуры, C-V-характеристики, эквивалентная схема замещения, частотно-емкостные зависимости, аккумуляция, обеднение, зонная диаграмма, глубокие уровни.

## Введение

Для исследования кристаллической структуры полупроводниковых материалов и многослойных полупроводниковых гетероструктур, а также анализа трансформации кристаллической структуры этих объектов в ходе роста и технологических процессов изготовления приборов широко используют методы рентгеновской дифрактометрии.

При решении таких экспериментальных задач основное условие — правильный выбор инструмента исследования. Для рентгеновских дифрактометрических исследований таким инструментом является первичный пучок рентгеновских лучей, сформированный под задачу эксперимента. При исследовании монокристаллических материалов и пленок обычно стремятся использовать как можно более тщательно монохроматизированный первичный пучок, стараются сделать его плоским и параллельным, избавиться от дифракционной составляющей на краях последнего коллиматора, ставя после него еще один кристалл-монокроматор. Такая схема реализуется в хорошо известных двух- и трехкристалльных дифрактометрах для особо точных измерений [1]. Однако потеря мощности при работе на этих установках, составляющая до 99,99 %, обуславливает необходимость увеличения мощности рентгеновской трубки до 5—10 кВт, ужесточая требования по стабилизации напряжения и тока и к специально оборудованным помещениям для работы на дифракто-

метрах. Применение в современном однокристалльном многофункциональном дифрактометре XMD-300 поликапиллярной оптики Кумахова, основанной на полном внешнем отражении пучков рентгеновских лучей от стенок капилляров диаметром 30 мкм, собранных в монолитную полулинзу (конденсор), позволяет значительно сократить размеры устройства формирования первичного рентгеновского пучка и частично его монохроматизировать, а рассеяние на краях капилляров и вырезающей щели методологически использовать для получения общей интерференционной картины дифракции в рассеянном излучении при отсутствии характеристических отражений для монокристалльной схемы  $\theta-\theta$ . Использование такой рентгеновской оптики, формирующей квазипараллельный рентгеновский пучок ( $200 \times 6000 \text{ мкм}^2$ ) позволяет снизить мощность рентгеновской трубки на три порядка (до 5—10 Вт) при сохранении высокой интенсивности. Потери при точном соблюдении условия брегговской дифракции составляют до 60—70 % в зависимости от атомного номера анода. Значительный выигрыш в интенсивности измерений позволяет использовать в XMD-300 рентгеновские трубки, обладающие при высокой удельной яркости столь малой мощностью (50 Вт!), что уровень радиационного фона не превышает природный. Кроме того, дифрактометр обладает еще рядом преимуществ. В частности, конструкция установки, обеспечивающая перемещение ее отдельных узлов друг относительно друга,

делает дифрактометр многооперационной гибкой системой, позволяющей получать информацию в большом диапазоне углов. Имеющееся программное обеспечение дифрактометра позволяет снимать дифрактограммы в схеме  $\theta$ — $\theta$  при повороте оси системы трубка—детектор на произвольный угол и в схеме  $\theta$ — $2\theta$  при жестко зафиксированной вертикальной оси. При необходимости вертикальную ось можно отклонять по образующей конуса с интервалом 0,01 до 45°, с поворотами предметного стола на  $\pm 180^\circ$ , получая внутреннюю половину полусферы Эвальда.

Основным недостатком дифрактометра XMD-300 при исследовании монокристаллических материалов является, конечно, недостаточная монохроматичность рентгеновского пучка, что приводит к неполному отсечению тормозного излучения. Появление «тормозного» пика при дифрактометрических исследованиях может приводить к неправильной трактовке получаемых дифрактограмм. Кроме того, наблюдается недостаточная параллельность рентгеновского пучка из-за дифракции лучей на краях капилляров полулинзы Кумахова и ограничивающей свинцовой щели. Расходимость пучка составляет  $\pm 12''$ , что не позволяет получать узкие интерференционные максимумы при работе с монокристаллами с высоким структурным совершенством.

Ниже рассмотрены результаты разработки методологических приемов работы на дифрактометре XMD-300, частично компенсирующих недостатки установки и позволяющих получать максимально полную и достоверную информацию при исследовании приповерхностных слоев различных полупроводниковых объектов, в частности гетероструктур с субмикро- и нанометровыми слоями.

#### Объект исследования и методика эксперимента

В ходе работы исследовали различные структуры:

- стандартные структуры кремний–на–сапфире (КНС–структуры) диаметром 100 мм, полученные на установке гетероэпитаксиального наращивания ЭТМ100/150 (изготовитель — ЗАО «Монокристалл», Россия) с эпитаксиальными слоями кремния толщиной 0,3—0,6 мкм;

- КНС с толщиной слоя 0,1 мкм (производитель Peregrine Semiconductor, США);

- КНС–подложки с изготовленными на них тестовыми приборными элементами;

- структуры «кремний–на–изоляторе» Si—SiO<sub>2</sub>—Si (КНИ–структуры), полученные различными технологическими методами и от разных фирм–производителей с толщиной рабочего слоя от 0,3 до 12 мкм;

- приповерхностные ионно–легированные слои кремния, полученные имплантацией ионов Ar<sup>+</sup> с энергией  $E = 300$  кэВ при различных дозах облучения;

- гетероструктуры AlGaN/GaN, выращенные на Si с толщиной рабочих слоев от 25 до 500 нм.

Для исследований применяли несколько методов рентгеновской дифрактометрии:

- наиболее распространенный метод симметричных отражений  $\theta$ — $2\theta$ , применяемый для снятия информации с кристаллографических плоскостей, параллельных поверхности;

- метод асимметричных отражений для получения информации с плоскостей, лежащих под углом к поверхности, так называемый метод скользящих рентгеновских лучей, при этом использовали обе схемы падения рентгеновских лучей [1];

- работа в геометрии скользящего падения первичного рентгеновского пучка;

- работа в геометрии скользящего отражения (рис. 1).

Так как объектами анализа являлись в основном монокристаллические структуры с двумя и более слоями субмикрометровой толщины с разным параметром решетки, целесообразно использование метода асимметричных отражений, позволяющего получать интерференционную картину дифракции, соответствующую определенному слою многослойных структур. При исследовании слоев с толщиной, меньшей информативной глубины рентгеновской дифракции в нефокусирующей схеме Дебая—Шеррера (схема параллельного пучка), работа в геометрии скользящего падения первичного рентгеновского пучка является наиболее удобным и простым методом для практической реализации, поскольку метод основан на уменьшении глубины зондирования приповерхностного слоя образца за счет уменьшения угла скольжения рентгеновских лучей (см. рис. 1, а). При этом информативный объем образца остается большим, что позволяет послойно исследовать тонкие пленки. Применение в дифрактометре XMD-300 схемы скользящего первичного квазипараллельного рентгеновского пучка при использовании линейно-координатного детектора (угловой растров 10° по 2 $\theta$ ) позволяет наблюдать на дифрактограмме одновременно интерференционные максимумы от кристаллографических плоскостей разных материалов или отдельных слоев гетероструктур.

Использование второй схемы скользящего рентгеновского пучка также оказалось полезно для исследования тонких монокристаллических слоев полупроводниковых материалов (см. рис. 1, б). Метод скользящего дифрагированного пучка дает возможность повысить плотность потока рентгеновского излучения. В этом случае рентгеновское излучение

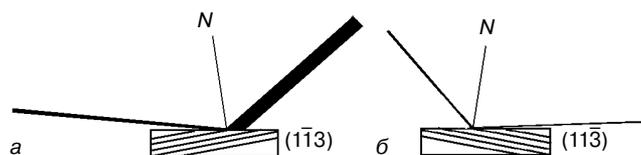


Рис. 1. Схемы асимметричных отражений:  
а — первичного скользящего пучка; б — скользящего дифрагированного пучка

падает на кристалл, в котором отражающие плоскости по отношению к поверхности расположены под углом, близким к брэгговскому углу; происходит как бы сжатие дифрагированного пучка в брэгговской плоскости. Использование такой схемы позволяет получить информацию о положении интерференционного максимума от слоя с малой толщиной независимо от его расположения в гетероструктуре. Кроме того, эта схема дает возможность при использовании специальных устройств дифрактометра XMD-300 (*offset tube* и *offset detector*) очень точно разделять или совмещать интерференционные максимумы от характеристической и тормозной частей рентгеновского спектра. Такой способ измерения позволяет, например, прежде чем проводить съемку КНС-структуры в геометрии  $\theta-\theta$  или  $\theta-2\theta$ , провести съемку на скользящем дифрагированном пучке для кремния или сапфира. При поверхностной ориентировке сапфира (1011) угол встречи первичного пучка для реальных структур находится вблизи расчетного угла отражения от плоскости (1014) и составляет  $56^\circ$ , а для кремния для плоскости (1113) — вблизи  $53^\circ$ . Несмотря на то, что интерференционный максимум дифракции получается очень узким, он очень хорошо расщепляется на два максимума: характеристический и тормозной. При работе в геометрии  $\theta-\theta$  или  $\theta-2\theta$ , в зависимости от поставленных задач, бывает необходимо либо совместить эти максимумы, либо, наоборот, вывести тормозной максимум в область меньших или больших углов дифракции на желаемую величину. При использовании схемы со скользящим дифрагированным пучком можно, изменяя независимое смещение (*offset*) трубки, провести необходимые юстировки и далее приступить к съемке в геометрии  $\theta-\theta$  или  $\theta-2\theta$ . Интерференционный максимум от тормозного излучения смещается в направлении пошаговой съемки.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

В соответствии с производственной необходимостью, в работе рассматривали возможность применения дифрактометра XMD-300 для решения ряда практических задач по изучению полупроводниковых гетероструктур.

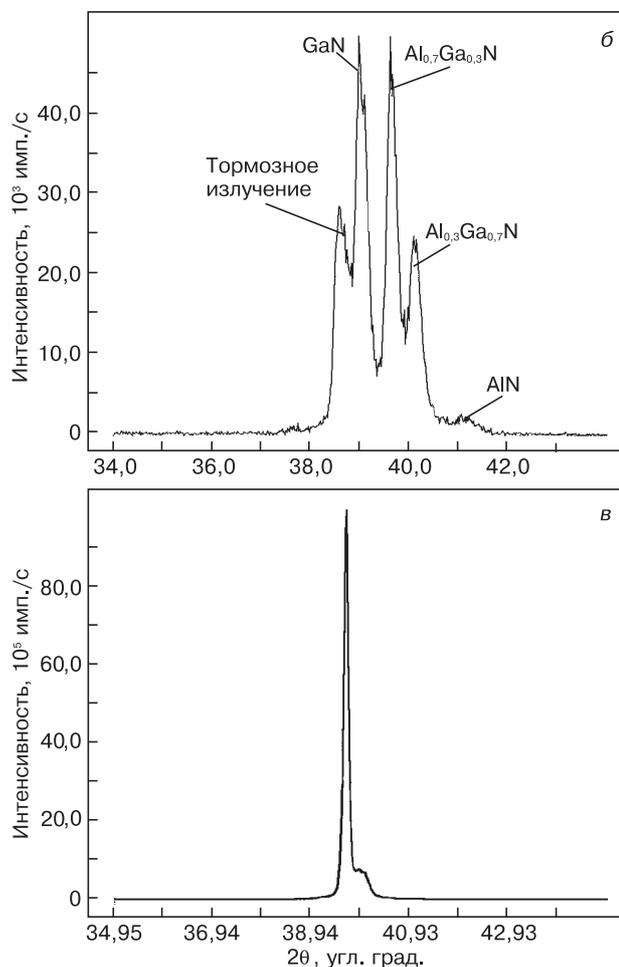
**Анализ многослойных полупроводниковых гетероструктур методом симметричных отражений  $\theta-2\theta$  при разном материале подложки и рабочих слоев.** Объектом исследования была выбрана многослойная полупроводниковая гетероструктура (рис. 2, а) с эпитаксиальными слоями AlGaN/GaN, выращенными на подложке Si (111). Измерения проводили в геометрии симметричной брэгговской дифракции от кристаллографических плоскостей, совпадающих с поверхностью рабочих эпитаксиальных слоев. В рассматриваемом случае — от плоскостей (0002), поскольку эта система плоскостей гексагонального GaN дает наиболее интенсивное отражение.

Дифракция на краях капилляров при работе в геометрии  $\theta-2\theta$  дает дополнительную возможность проводить съемку в рассеянном излучении и получать интерференционную картину дифракции одновременно от системы кристаллических плоскостей (0002) нескольких слоев гетероструктуры с близкими параметрами решетки. На рис. 2 представлена дифрактограмма такой многослойной структуры. Разработана методика идентификации и вывода тормозного пика из зоны наблюдения (см. рис. 2, б). Как видно из рис. 2, такая интерференционная картина, полученная в рассеянной части спектра первичного пучка, позволяет одновременно идентифицировать слой GaN, AlN и AlGaN с различным содержанием

Al <sub>0,27</sub> Ga <sub>0,73</sub> N 25 нм
AlN 1 нм
Al <sub>0,1</sub> Ga <sub>0,9</sub> N 10 нм
AlN 1 нм
GaN 500 нм
Al <sub>0,3</sub> Ga <sub>0,7</sub> N → Al <sub>0,1</sub> Ga <sub>0,9</sub> N 70 нм
Al <sub>0,3</sub> Ga <sub>0,7</sub> N 280 нм
AlN → Al <sub>0,3</sub> Ga <sub>0,7</sub> N(grad) 150 нм
AlN 43 нм
Si (111)

а

Рис. 2. Схема гетероструктуры AlGaN/GaN (а), выращенной на подложке Si(111), и рентгеновские дифрактограммы при съемке в геометрии  $\theta-2\theta$  (б, в): б — в рассеянной части спектра первичного пучка; в — при точном соблюдении условия брэгговской дифракции для GaN



Ga и Al, давая общую дифракционную картину многослойной структуры при интенсивности импульсов до  $5 \cdot 10^4$ .

Интерференционные пики максимальной интенсивности для каждого отдельного слоя могут быть получены при точном соблюдении условия брэгговской дифракции для характеристического излучения при отражении от определенного слоя гетероструктуры. В настоящее время значения брэгговских углов для данной системы плоскостей при разном содержании Al хорошо известны [2]. Снимая дифрактограммы в условиях строгой брэгговской дифракции, можно получить интерференционные максимумы от каждого отдельного слоя гетероструктуры [3]. На рис. 2, в показана дифрактограмма с соответствующим отдельному слою GaN интерференционным максимумом, из которого «выходит» небольшой пик тормозного излучения. Как видно из рис. 2, в интенсивность пика, соответствующего GaN при точном соблюдении условия брэгговской дифракции, на два порядка выше, чем при съемке в рассеянном излучении. Таким образом, используя два вида съемки по схеме  $\theta-2\theta$ , можно получить общую картину, определяющую наличие отдельных слоев в сложной гетерострук-

туре AlGaIn/GaN и проанализировать в отдельности интерференционные максимумы для каждого слоя многослойной гетероструктуры.

**Анализ эпитаксиальных полупроводниковых гетероструктур методом симметричных отражений  $\theta-2\theta$  при одинаковом материале подложки и эпитаксиального слоя с субмикрометровыми разделительными слоями.** В качестве объекта использовали КНИ-структуры с разделительным оксидом толщиной от 0,4 до 1 мкм, полученные различными методами и разными производителями. Измерения проводили в геометрии симметричной брэгговской дифракции от кристаллографических плоскостей (100). В данном случае оказалось, что дифрактометр XMD-300 из-за малой интенсивности используемого излучения имеет определенные преимущества по сравнению с другими дифрактометрами при анализе разделительных слоев в такой полупроводниковой системе: он дает возможность получить и идентифицировать малосигнальные пики от таких тонких разделительных слоев оксида. При увеличении интенсивности первичного рентгеновского пучка точная юстировка, проведенная с помощью схемы скользящего дифрагированного пучка, позволила определить модификацию структуры разделительного слоя SiO<sub>2</sub> в различных КНИ-структурах. В частности, оказалось, что многие из них в зависимости от метода получения и производителя имеют различные по фазовому составу разделительные слои. Так, в КНИ-структурах производства фирмы Ice Mos Technology с толщиной рабочего слоя 5 мкм хорошо идентифицируются интерференционные пики  $\alpha$ -кварца (104) и (302) (рис. 3, а). В КНИ-структурах той же фирмы с толщиной рабочего слоя 2 мкм идентифицируется интерференционный пик  $\alpha$ -кристобалита (330) (рис. 3, б). На других КНИ-структурах этой же фирмы, а также на экспериментальных структурах, сделанных в НПП «Пульсар» (Россия), не наблюдали подобных интерференционных пиков, что свидетельствует об аморфной модификации SiO<sub>2</sub> в данных структурах. Экспериментальные результаты показали также, что в КНИ-структурах, полученных SIMOX-методом, разделительный оксид имеет, как

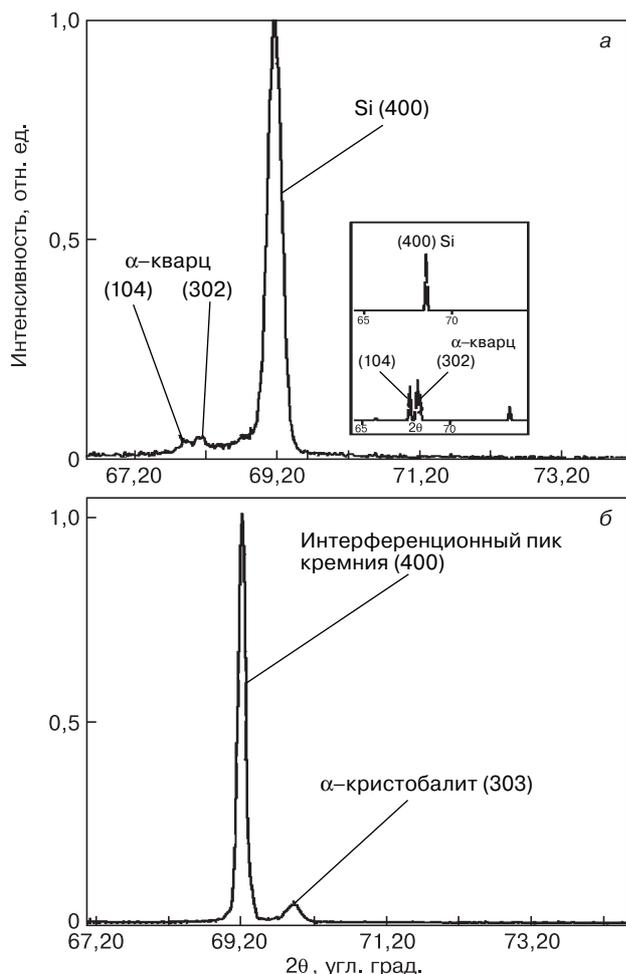


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы КНИ-структур производства фирмы Ice Mos Technology с различной модификацией разделительного диэлектрика SiO<sub>2</sub> при съемке в геометрии  $\theta-2\theta$ : а —  $\alpha$ -кварц; б —  $\alpha$ -кристобалит

Таблица 1

**Сравнение параметра ПППВ для рабочих слоев структур кремний-на-изоляторе в зависимости от кристаллической структуры SiO<sub>2</sub>**

Изготовитель КНИ	Толщина слоя Si, мкм	Кристаллическая фаза SiO <sub>2</sub>	ПППВ (по 2θ), угл. град.
Ice Mos Technology, США	5	$\alpha$ -кварц	0,216
	2	$\alpha$ -кристобалит	0,12
Soitec, Франция	0,34	Аморфный	0,13
ФГУП «НПП «Пульсар», Россия	6	То же	0,126
	12	— " —	0,12

правило, аморфную структуру. Более того, сравнительные исследования структурного совершенства эпитаксиальных слоев кремния в таких структурах выявили зависимость кристаллического совершенства рабочего слоя кремния КНС-структуры от модификации  $\text{SiO}_2$ . Как видно из табл. 1, ширина пика на половине высоты (ПШПВ) для дифракционного пика (400) рабочего слоя кремния зависит от модификации лежащего ниже слоя  $\text{SiO}_2$ : значение ПШПВ наибольшее для  $\alpha$ -кварца.

**Исследование КНС-структур с субмикрометровыми слоями с использованием двух схем асимметричных отражений.** На рис. 4 представлены дифрактограммы отражения при съемке в геометрии скользящего первичного рентгеновского пучка [4], в частности, при угле падения первичного пучка относительно поверхности (угол встречи)  $2,87^\circ$ , для трех КНС-структур с толщиной слоя кремния 0,1, 0,3 и 0,6 мкм. Наиболее близок к расчетному значению брэгговского угла отражения от плоскости (113) Si угол, соответствующий структуре с толщиной рабочего слоя 0,3 мкм. Кроме того, для структуры с толщиной слоя 0,3 мкм интенсивность отраженного луча значительно превышает величину, которая должна быть в случае пропорциональности интенсивности отражения толщине слоя при одинаковом качестве кристаллической структуры исследуемых слоев. Как видно из рис. 4, интерференционные максимумы отражения от структуры с толщиной слоя 0,6 и 0,1 мкм расположены по обе стороны от максимума отражения для структуры с толщиной рабочего слоя кремния 0,3 мкм. Таким образом, эти данные позволяют говорить о более высоком структурном совершенстве эпитаксиального слоя кремния структуры с толщиной слоя 0,3 мкм. Кроме того, анализ дифрактограмм на рис. 4 позволяет предположить различие в знаке упругих деформаций у эпитаксиальных слоев кремния этих структур: сжатие у структуры с толщиной слоя 0,1 мкм и растяжение у структуры с толщиной слоя 0,6 мкм.

КНС-структуру с толщиной слоя 0,3 мкм более детально анализировали с использованием двух схем съемки со скользящим рентгеновским пучком. На рис. 5 показаны зависимости интенсивности интерференционных максимумов от угла для этой структуры, снятые по схеме скользящего первичного пучка (рис. 5, а) и скользящего дифрагированного пучка (рис. 5, б); показаны режимы, при которых проводили запись дифрактограмм. Как видно из рис. 5, а, схема скользящего первичного пучка позволяет наблюдать одновременно максимумы отражения от плоскости (113) Si и от плоскости (10 $\bar{1}$ 4)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , в то время как схема скользящего дифрагированного пучка требует отдельной настройки (положение трубки и детектора) для получения

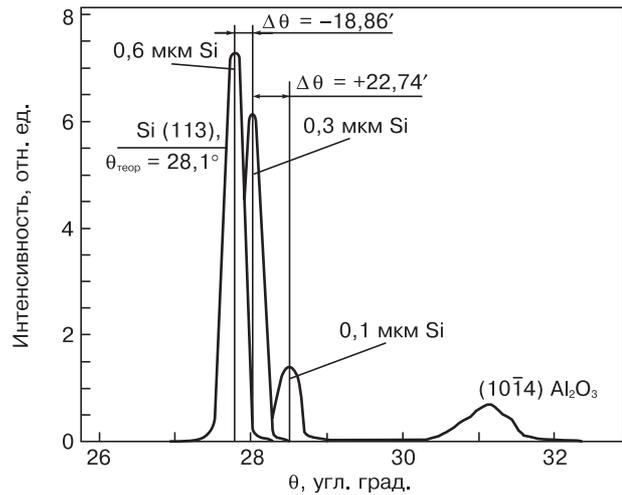


Рис. 4. Рентгеновские дифрактограммы КНС-структур с различной толщиной рабочего слоя кремния (0,1, 0,3 и 0,6 мкм) при съемке на скользящем первичном рентгеновском пучке при угле встречи  $2,87^\circ$

максимумов отражения от плоскости (113) Si и плоскости (10 $\bar{1}$ 4)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . ПШПВ от плоскости кремния в схеме скользящего первичного пучка примерно в 4 раза превышает значение, полученное при измерении по схеме скользящего дифрагированного пучка при значительно меньшей интенсивности.

Проведенный анализ результатов исследования одних и тех же многослойных структур с использованием двух схем съемки со скользящим пучком выявил оптимальность использования каждой схемы для решения конкретных задач. В частности, применение метода скользящего первичного пучка позволило провести сравнительную оценку кристаллической структуры рабочего слоя кремния различных КНС-структур, выращенных в разное время и с разной толщиной слоя кремния. Сравнительный анализ двух методов показал, что в случае необходимости оценки совершенства кристаллической структуры отдельного слоя (например, слоя

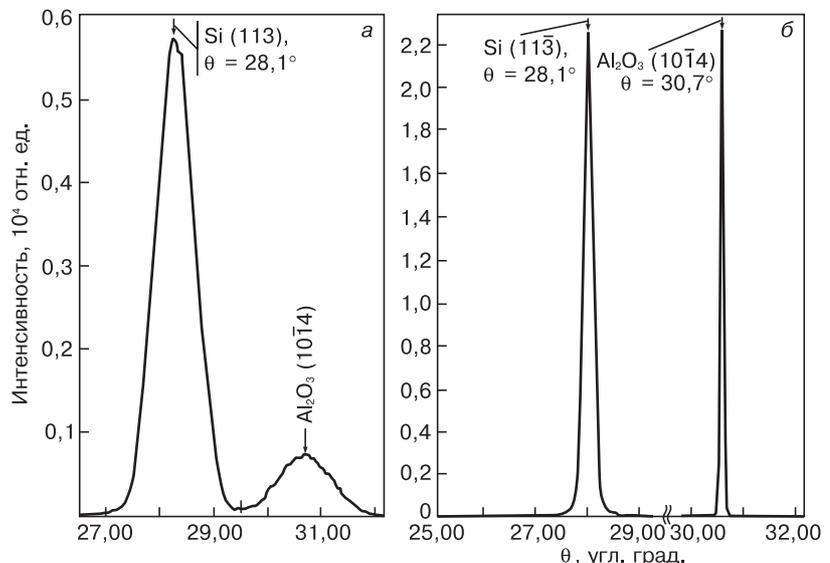


Рис. 5. Рентгеновские дифрактограммы КНС-структуры с толщиной рабочего слоя 0,3 мкм при съемке в асимметричном отражении: а — на скользящем первичном пучке; б — на скользящем дифрагированном пучке

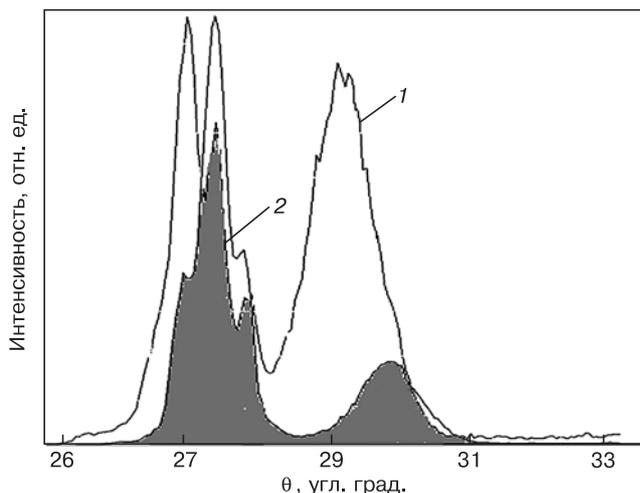


Рис. 6. Рентгеновские дифрактограммы асимметричной съемки КНС-структуры со сформированными на ней элементами приборных структур при двух углах падения скользящего первичного пучка: 1 — угол встречи 2,30°; 2 — 2,65°

кремния КНС-структуры) или материала подложки и его изменения в технологических процессах по величине ПППВ более удобно использовать схему

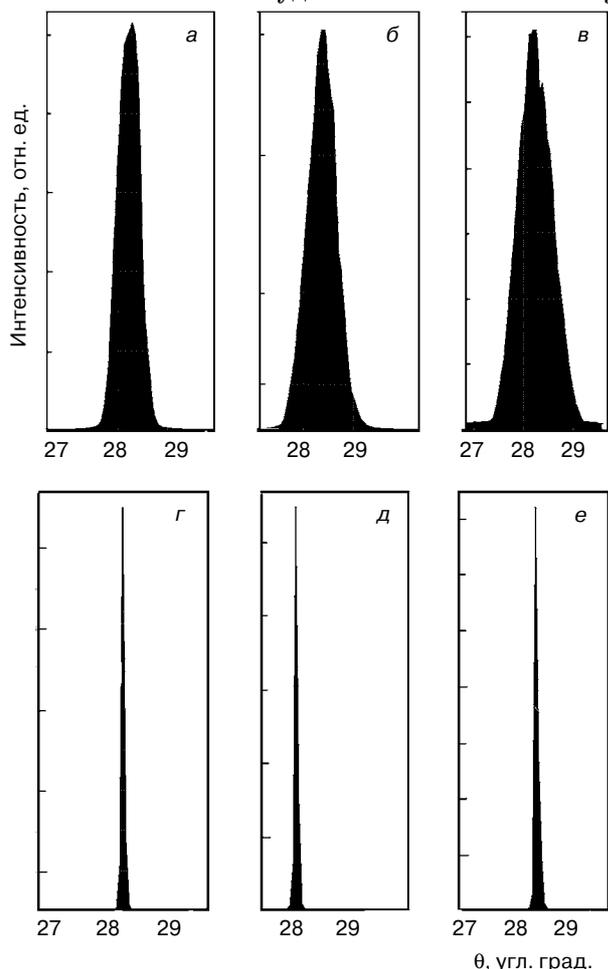


Рис. 7. Рентгеновские дифрактограммы асимметричной съемки кремния до (а, г) и после (б, в, д, е) ионной имплантации ионов Ar<sup>+</sup> с E = 300 кэВ при двух разных дозах легирования: а — съемка на скользящем первичном пучке; б — на дифрагированном скользящем пучке; б, д — D<sub>1</sub> = 6,2 · 10<sup>12</sup> см<sup>-2</sup>; в, е — D<sub>2</sub> > D<sub>1</sub>. Отражение Si(113̄)

скользящего дифрагированного пучка. Однако следует отметить, что измерения по этой схеме можно использовать только для исследования достаточно глубоких слоев, что связано с большими углами падения первичного дифрагированного луча. Кроме того, как упоминалось выше, эта схема является инструментом точной юстировки для последующих измерений как по схеме брэгговской дифракции в геометрии  $\theta-\theta$  или  $\theta-2\theta$ , так и по схеме скользящего первичного пучка.

Для выявления отдельных тонких слоев многослойной гетероструктуры с близкими брэгговскими углами и изучения изменений их кристаллической структуры в ходе выращивания или технологических процессов оптимально использовать съемку в геометрии скользящего первичного рентгеновского пучка. В связи с этим для оценки КНС со сформированными на них элементами приборных структур использовали схему первичного скользящего рентгеновского пучка. Как видно из сравнения дифрактограмм на рис. 6, изменение угла падения первичного скользящего пучка на десятые доли градуса приводит к исчезновению одних и появлению других максимумов интерференционного пика. Вероятно, интерференционные максимумы, наблюдаемые на дифрактограмме, относятся к слоям, сформированным в кремнии диффузией легирующей примеси с последующей термообработкой; более детальный анализ этих пиков может позволить оценить хотя бы относительно технологические процессы формирования элементов приборных структур.

**Изучение поверхностных областей монокристаллического материала после создания в нем тонких слоев, перенасыщенных собственными и примесными точечными дефектами [5] при двух схемах измерения асимметричных отражений.** Анализировали ионно-легируемые слои кремния после имплантации ионов Ar<sup>+</sup> с энергией E = 300 кэВ при двух дозах облучения. На рис. 7 представлены дифрактограммы кремния до и после имплантации при съемке в двух геометриях падения рентгеновского пучка: на рис. 7, а—в показаны рентгеновские дифрактограммы, измеренные по схеме первичного скользящего пучка с углом встречи 2,77°, на рис. 7, г—е — при съемке в геометрии дифрагированного пучка с углом встречи первичного пучка 53,60°. Проективный пробег ионов Ar<sup>+</sup> с E = 300 кэВ составил R<sub>p</sub> ~ 0,33 мкм, толщина слоя, перенасыщенного собственными и примесными точечными дефектами ~0,4 мкм.

В табл. 2 приведены значения ПППВ, полученные из дифрактограмм, представленных на рис. 7. Как видно из данных табл. 2 и рис. 7, а, использование первичного скользящего пучка наглядно демонстрирует расширение интерференционного максимума с ростом дозы: увеличение ПППВ при дозе D<sub>1</sub> по сравнению с ПППВ чистого кремния и далее рост при дозе D<sub>2</sub> > D<sub>1</sub>. Это свидетельствует о накоплении точечных дефектов в объеме, приводящем в итоге к аморфизации тонкого поверхностного слоя.

Таблица 2

## Заключение

### Характеристики интерференционных пиков для отражения Si(113) в ионоимплантированных образцах монокристаллического кремния

$D_1, 10^{12} \text{ см}^{-2}$	ПШПВ, угл. град.	$I_{\max}$	ПШПВ, угл. град.	$I_{\max}$
	Схема съемки I		Схема съемки II	
До облучения	0,52	$\sim 5 \cdot 10^4$	$< 0,3$	$2,4 \cdot 10^5$
6,2	0,6	$\sim 2 \cdot 10^4$	То же	$1,2 \cdot 10^5$
$D_2 > D_1$	0,81	$\sim 6 \cdot 10^{34}$	— " —	$7 \cdot 10^3$

*Примечание.* Схема съемки I — съемка на скользящем первичном рентгеновском пучке; схема съемки II — съемка на скользящем дифрагированном рентгеновском пучке;  $I_{\max}$  — интенсивность максимума пика.

Измерения в геометрии скользящего дифрагированного пучка (рис. 7, б и табл. 2) дают совершенно иную картину: интерференционные максимумы при ионном легировании не изменяются с ростом дозы и точно соответствуют значению ПШПВ чистого кремния. Это связано именно с глубиной проникновения рентгеновского излучения при угле падения  $53,60^\circ$ : полученные интерференционные максимумы соответствуют слою кремния, лежащему под ионно-легированным слоем.

Проведенные исследования целого комплекса полупроводниковых объектов показали, что использование более дешевого, менее сложного в эксплуатации, менее энергоемкого и радиационно опасного по сравнению с двух- и трехкристалльным рентгеновским дифрактометром однокристалльного дифрактометра XMD-300, оснащенного рентгеновской оптикой Кумахова, позволяет получать информацию о кристаллической структуре различных полупроводниковых многослойных структур, в частности, гетероструктур широкозонных полупроводниковых материалов с субмикронными и наноразмерными слоями. Наиболее перспективным для оценки кристаллической структуры сверхтонких приповерхностных слоев полупроводниковых структур является метод асимметричных отражений [6] при использовании съемки в двух геометриях скользящего рентгеновского луча. Использование рентгеновского излучения малой интенсивности позволяет решать ряд задач, в частности исследовать разделительный оксид в КНИ-структурах, решение которых при использовании классических двух- и трехкристалльных дифрактометров практически невозможно.

Показано, что рентгеновский дифрактометр XMD-300 с поликапиллярной оптикой Кумахова дает возможность проводить исследования многослойных гетероструктур с использованием съемки на скользящем первичном пучке и на скользящем дифрагированном пучке. Такие схемы съемок позволяют получать интерференционную картину дифракции от плоскостей, лежащих под углом к базовой плоскости исследуемой структуры и наиболее чувствительных к упругим деформациям решетки.

Установлено, что интерференционная картина, полученная в рассеянной части спектра первичного пучка, позволяет одновременно идентифицировать слои GaN, AlN и AlGaN в многослойной гетероструктуре AlGaIn/GaN на Si с последующей идентификацией каждого отдельного слоя при точном соблюдении условия брэгговской дифракции.

Использование схемы скользящего первичного пучка позволяет проводить сравнительную оценку кристаллической структуры слоев кремния КНС-структур при толщине рабочих слоев 0,1 мкм и более. Изменяя угол встречи от 1,2 до  $3^\circ$ , можно проводить послойную оценку кристаллической структуры рабочего слоя кремния в КНС с приборными структурами.

Обнаружено, что съемка рентгеновских дифрактограмм при малых интенсивностях первичного рентгеновского пучка позволяет определить кристаллическую фазу  $\text{SiO}_2$  ( $\alpha$ -кварц,  $\alpha$ -кristобалит) в КНИ-структуре и оценить совершенство кристаллической структуры рабочего слоя кремния.

#### Библиографический список

1. Кузьмин, Р. Н. Рентгеновская оптика / Р. Н. Кузьмин // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – № 2. – С. 1–7.
2. Enisherlova, K. L. The spatial features  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  heterostructures / K. L. Enisherlova, R. M. Immamov, L. M. Subbotin // Proc. of SPIE. Micro- and nanoelectronics. – 2008. – V. 7025. – P. 702518–8.
3. Васильев, А. Г. Исследование структур AlGaIn/GaN методом рентгеновской дифрактометрии / А. Г. Васильев, К. Л. Енишерлова, А. В. Лютцау, Э. М. Темпер, Т. Ф. Русак // Электрон. техника. Полупроводниковые приборы. серия 2. – 2010. – Вып. 2(225). – С. 13–27.
4. Боуэн, Д. К. Высокорастворимая рентгеновская дифрактометрия и топография / Д. К. Боуэн, Б. К. Таннер. – СПб.: Наука, 2002. – 270 с.
5. Bublik, V. T. The influence of photoexcitation in situ on a generation of defect structure during ion implantation into Si substrates. / V. T. Bublik, V. N. Mordkovich, K. D. Shcherbachev, D. M. Pazhin // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2005. V. 38, N 10A. – P. A126–A131.
6. Пинскер, З. Г. Рентгеновская кристаллооптика / З. Г. Пинскер. – М.: Наука, 1982. – 390 с.

## Алфавитный список авторов статей

**Агафонова Марина Александровна** — студентка, МИТХТ им. М. В. Ломоносова, 119571, г. Москва, просп. Вернадского, д. 86, e-mail: m.a.r.90@mail.ru.

**Антипов Владимир Валентинович** — кандидат техн. наук, НИТУ «МИСиС», 119049, г. Москва, Ленинский просп., д. 4.

**Анфимов Илья Михайлович** — инженер, НИТУ «МИСиС», 119049, г. Москва, Ленинский просп., д. 4, e-mail: ilan@astecom.ru.

**Балагуров Леонид Анатольевич** — кандидат физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, ОАО «Гиредмет», 119017, г. Москва, Б. Толмачевский пер., д. 5, e-mail: lbalagurov@mail.ru.

**Бублик Владимир Тимофеевич** — доктор физ.-мат. наук, профессор, НИТУ «МИСиС», 119049, г. Москва, Ленинский просп., д. 4.