

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Лисовенко Дмитрия Сергеевича на диссертацию Гращенко Александра Сергеевича «**Механические свойства пленок нано-SiC синтезированных методом замещения атомов на Si и гетероструктур, выращенных на их основе**», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 - «Механика деформируемого твердого тела»

Актуальность работы

Основным полупроводниковым материалом, на базе которого в настоящее время изготовлено большинство разнообразных приборов является кремний (Si). Однако кремний обладает рядом недостатков, к которым можно отнести то, что с повышением окружающей температуры и радиации его полупроводниковые свойства сильно ухудшаются, появляется нестабильность в работе приборов. Кремний обладает и рядом других неустраняемых недостатков. В связи с этим идет интенсивный поиск полупроводниковых материалов, способных хотя бы, частично заменить Si. В последнее время особый интерес вызывают такие полупроводниковые материалы как карбид кремния (SiC), нитрид галлия (GaN), нитрид алюминия (AlN), оксид галлия (Ga_2O_3) и ряд других материалов. Производство подложек и тонких пленок таких полупроводниковых соединений нужного качества является очень технологически сложным и дорогостоящим. Один из методов получения подложек и тонких пленок является метод согласованного замещения атомов, который изначально позволял синтезировать эпитаксиальные слои SiC внутри матрицы Si. Метод согласованного замещения атомов позволяет также синтезировать тонкие пленки таких широкозонных полупроводников, как AlN, GaN и Ga_2O_3 и ряд твердых растворов этих соединений на кремниевой подложке, покрытой буферным слоем SiC.

В процессе синтеза, как самого буферного слоя SiC, так и последующих слоев AlN, GaN и Ga_2O_3 образуются различного рода дефекты. Наличие дефектов недопустимо при производстве полупроводниковых и оптоэлектронных приборов. Наличие дефектов приводят к неоднородностям механических свойств. В связи с этим, встает острая необходимость в определении упругих механических и прочностных свойств наномасштабных слоев SiC, синтезированных методом согласованного замещения атомов и тонких пленок AlN, GaN и Ga_2O_3 , выращенных на гибридных подложках нано-SiC/Si.

Таким образом, измерение параметров твердости и модуля упругости этих новых полупроводниковых гетероструктур является актуальной научной задачей.

Диссертация Гращенко А.С. посвящена разработке методик измерения механических параметров и деформационных свойств наномасштабных твердых пленок на мягких подложках и измерению прочностных характеристик гибридных структур нано-SiC на Si и пленок AlN GaN и Ga₂O₃, выращенных на гибридных подложках нано-SiC/Si.

Краткий анализ содержания работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка сокращений и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы диссертационной работы и сформулированы ее цели и задачи, перечислены полученные в диссертации новые результаты, их практическую значимость и представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации приведено описание экспериментальной техники наноиндентирования и устройство приборов, реализующих концепцию наноиндентирования, в частности, твердомера Nano Test 600, на котором осуществлялись измерения, представленные в диссертации. Описаны основные ошибки, возникающие в процессе наноиндентирования в нанометровом масштабе и способы их учета при анализе данных. Представлены аппроксимационные модели, позволяющие описывать эффективные параметры твердости и модуля упругости системы пленка-подложка в зависимости от глубины погружения наконечника в образец.

Второй раздел первой главы посвящен методу согласованного замещения атомов. В рамках этой части автор описывает основные принципы метода, историю его создания и конструкцию экспериментальных установок, позволяющих синтезировать гибридные структуры нано-SiC/Si. Также в этом разделе автор рассказывает о структурных особенностях, как самих наномасштабных пленок SiC, так и гибридных структур SiC/Si, синтезированных методом согласованного замещения в целом.

В третьем разделе первой главы описан метод хлорид-гидридной эпитаксии (ХГЭ) тонких пленок AlN, GaN и Ga₂O₃ на подложках нано-SiC/Si, синтезированных методом согласованного замещения атомов. Рассмотрены основные принципы метода ХГЭ и конструкция экспериментальных установок, позволяющих осуществлять рост пленок и объемных кристаллов по методу ХГЭ.

Во второй главе диссертации были описаны результаты экспериментальных измерений механических характеристик и деформационных свойств кристаллов SiC, Si и гибридных подложек nano-SiC/Si, синтезированных методом согласованного замещения атомов. Представлены экспериментальные данные наноиндентирования монокристаллической подложки SiC политаипа 4H-SiC в зависимости от полярности грани и пластин Si с ориентацией (001), (011) и (111). Представлены уникальные исследования гибридных подложек SiC/Si методом наноиндентирования. Измерены механические и деформационные характеристики гибридных подложек SiC/Si(001), SiC/Si(011) и SiC/Si(111), синтезированных методом замещения атомов. Апробировано несколько моделей описания экспериментальных зависимостей эффективной твердости и модуля упругости для случая наномасштабного слоя. С помощью этих моделей рассчитаны значения твердости и модуля упругости пленки nano-SiC и модифицированного слоя Si. Предложена новая аппроксимационная модель для описания экспериментальной зависимости эффективной микротвердости жесткой наномасштабной двухслойной пленки на мягкой подложке в зависимости от глубины погружения индентора в исследуемый образец. Рассмотрена и описана обратимая деформация, протекающая в поверхностных слоях гибридных подложках SiC/Si(001) и SiC/Si(111) при наноиндентировании, и определен модуль упругости слоев nano-SiC вблизи поверхности.

Третья глава посвящена наноиндентированию гетероструктур AlN/SiC/Si, GaN/SiC/Si и GaN/AlN/SiC/Si, сформированных ХГЭ на гибридных подложках nano-SiC/Si, синтезированных методом согласованного замещения атомов. Представлены результаты исследования структурных характеристик гетероструктур AlN/SiC/Si, GaN/SiC/Si и GaN/AlN/SiC/Si, полученные с помощью атомно-силовой микроскопии и спектральной эллипсометрии. Измерена и проанализирована деформация, происходящая в результате наноиндентирования в начальный момент вдавливания, и для всех образцов определен модуль упругости вблизи поверхности. Также для исследуемых гетероструктур были впервые экспериментально получены и промоделированы зависимости эффективных параметров твердости и модуля упругости от глубины погружения индентора в материал. По данным моделирования были определены значения твердости и модуля упругости пленок AlN и GaN, выращенных на гибридных подложках nano-SiC/Si.

В третьем разделе данной главы приведен анализ данных наноиндентирования гетероструктуры GaN/AlN/SiC/Si, с помощью метода атомно-силовой микроскопии и Рамановской спектроскопии подробно изучена остаточная от наноиндентирования деформация. Измерены характерные размеры остаточных отпечатков и визуализирована

остаточная деформация в пленке GaN и подложке Si вблизи остаточных отпечатков. Методом атомно-силовой микроскопии зарегистрированы трещины в пленке GaN, сформированной на гибридной структуре nano-SiC/Si с буферным слоем AlN, по размерам которых был рассчитан параметр вязкости разрушения.

В четвертом разделе третьей главы представлено исследование твердости гибридной подложки nano-SiC/Si, синтезированной методом согласованного замещения атомов и тонкой пленки AlN, сформированной методом ХГЭ на гибридной подложке nano-SiC/Si с помощью метода склерометрии. В рамках этого исследования проведены измерения структурных характеристик структур SiC/Si и AlN/SiC/Si, полученных из анализа данных атомно-силовой микроскопии и оптической спектральной эллипсометрии. Методом склерометрии были получены экспериментальные зависимости относительной твердости гибридной подложки nano-SiC/Si и тонкой пленки AlN на nano-SiC/Si от глубины царапины.

В четвертой главе диссертации представлено исследование структурных и прочностных свойств эпитаксиальных слоев Ga_2O_3 моноклинной сингонии, выращенных с помощью ХГЭ на гибридных подложках nano-SiC/Si, синтезированных методом согласованного замещения атомов на пластинах Si с кристаллографическими ориентациями (001), (011) и (111). Методами атомно-силовой и электронной сканирующей микроскопии были получены и проанализированы изображения поверхности пленок $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ и торцевые изображения гетероструктур $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{SiC}/\text{Si}$. В результате определены параметры шероховатости поверхности и толщины пленок $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ на гибридных подложках SiC/Si(001), SiC/Si(011) и SiC/Si(111). Методом наноиндентирования измерены параметры твердости и модуля упругости гетероструктур $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{SiC}/\text{Si}(001)$, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{SiC}/\text{Si}(011)$ и $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3/\text{SiC}/\text{Si}(111)$ на глубине погружения индентора в образец порядка 100 нм. Так же в четвертой главе представлены результаты компьютерного моделирования упругих и прочностных свойств кристалла $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ методами квантовой механики. Показано хорошее совпадение экспериментальных данных, полученных методом наноиндентирования и данных моделирования методами квантовой химии. Что свидетельствует о том, что упругопластические свойства пленок $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, выращенных на подложках Si с буферным слоем SiC, примерно соответствуют свойствам объемных кристаллов.

Автореферат отражает основное содержание диссертации.

**Основные результаты диссертационной работы, полученные лично соискателем и
обладающие новизной:**

- 1) В разработке абсолютно новой экспериментально проверенной аппроксимационной модели, позволяющей описать деформационные свойства наномасштабных двухслойных пленок на подложке.
- 2) В разработке абсолютно нового метода визуализации остаточной деформации после наноиндентирования в прозрачных и полупрозрачных материалах.
- 3) В измерении параметров твердости и модуля упругости новых материалов: слоев SiC, синтезированный на Si оригинальным методом согласованного замещения атомов и тонких пленок AlN, GaN и β -Ga₂O₃, выращенные методом хлорид-гидридной эпитаксии на гибридных подложках нано-SiC/Si.

Практическая значимость работы заключается:

- 1) В возможности применения разработанных и экспериментально апробированных методик наноиндентирования для анализа механических свойств широкого класса пленок нанометровых толщин.
- 2) В применении разработанного метода визуализации остаточной деформации для анализа деформационных процессов, протекающих в твердых телах при вдавливании, царапании и ударе наконечниками различной формы.
- 3) В пополнении справочных данных значениями параметров твердости и модуля упругости наномасштабных слоев SiC, синтезированный на Si оригинальным методом согласованного замещения атомов и тонких пленок AlN, GaN и β -Ga₂O₃, выращенные методом хлорид-гидридной эпитаксии на гибридных подложках нано-SiC/Si.

Достоверность научных положений, выносимых на защиту

Применение автором высокоточных экспериментальных техник и общепринятых методик анализа полученных экспериментальных данных, позволяет сделать вывод о достоверности представленных в диссертации результатов.

Результаты, полученные автором, обладают несомненной значимостью, как с фундаментальной, так и практической точек зрения, так как вносят существенный вклад в механику деформируемых наноматериалов, находящихся на поверхности кристаллических подложек.

Замечания по диссертации:

- 1) На стр.32, 33 и 38 функция тангенса обозначена как $\tan(x)$, а не $\operatorname{tg}(x)$, как принято в отечественной литературе.
- 2) В диссертации обсуждаются механические свойства $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ и $\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$, но ни где не сказано чем отличаются данные материалы.
- 3) На стр.11 в пункте 8 Научной новизны указано, что «кристалл $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ является ауксетиком», т.е. материалом, который обладает отрицательным коэффициентом Пуассона. Однако на стр.124-125 при анализе упругих свойств данного кристалла, продемонстрировано, что минимальное значение коэффициента Пуассона равно нулю. На этих же страницах, например, приведены значения коэффициентов Пуассона ν_{xy} и ν_{yx} , но не указано какие направления являются направлением растяжения и поперечной деформации. В матрице коэффициентов жесткости (4.2) и матрице коэффициентов податливости (4.3) допущены опечатки: $c_{15} = 0, s_{23} = 0$, а $s_{15} \neq 0$ и $c_{23} \neq 0$.
- 4) В списке литературы у источника 23 указаны не полные выходные данные.
- 5) В диссертации присутствуют опечатки.

Указанные замечания имеют рекомендательный характер и не снижают научной ценности работы.

Заключение

Представленная к защите диссертация является законченной научно-квалификационной работой, посвящённой актуальной теме и выполненной на высоком уровне. Полученные в работе результаты обладают новизной, представляют как научный, так и практический интерес, соответствуют пунктам 4 и 8 паспорта специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела». Выносимые на защиту положения прошли достаточную апробацию и были опубликованы в 3 статьях в рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК и индексируемых в Web of Science и Scopus. Автореферат полно отражает основные результаты диссертации.

Считаю, что диссертация «Механические свойства пленок нано-SiC, синтезированных методом замещения атомов на Si и гетероструктур, выращенных на их основе» полностью соответствует критериям п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждения ученых степеней» (Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842), «О внесении изменений в Положение о присуждения ученых степеней (Постановление Правительства РФ от 21.04.2016 г. № 335), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор

Гращенко Александр Сергеевич, несомненно заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 - «Механика деформируемого твердого тела».

Официальный оппонент:

Заведующий лаборатории механики
технологических процессов

Института проблем механики

имени А.Ю. Ишлинского РАН,

Доктор физико-математических наук,

Профессор РАН

«06» июня 2022 г.

Лисовенко Дмитрий Сергеевич

Контактные данные:

Телефон: +7(495) 433-34-96

email: lisovenk@ipmnet.ru

Адрес места работы:

Федеральное государственное учреждение науки Институт проблем механики им.
А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

119526, г. Москва, проспект Вернадского, д. 101, к. 1.

Телефон: +7(495) 434-00-17

Сайт: <https://www.ipmnet.ru>

Подпись Д.С. Лисовенко заверяю

Ученый секретарь ИПМех РАН

кандидат физико-математических наук



Котов Михаил Алтаевич