

ОТЗЫВ
официального оппонента

на диссертационную работу Гращенко Александра Сергеевича
«Механические свойства пленок нано-SiC, синтезированных методом замещения
атомов на Si и гетероструктур, выращенных на их основе»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
1.1.8 (ранее 01.02.04) – Механика деформируемого твердого тела

Актуальность темы диссертации. Метод наноиндентирования является одним из самых эффективных методов исследования различных физико-механических свойств как объемных материалов, так и тонких пленок. Обычно характерные толщины пленок, исследуемых методом наноиндентирования составляют несколько микрометров и более. В связи с этим методики анализа и моделирования данных наноиндентирования тонких пленок ориентированы на толщину исследуемого слоя порядка микрона. Однако непрерывное уменьшение характерных размеров электронных компонентов и других продуктов нанотехнологий приводит к необходимости изучать деформационные и прочностные свойства наномасштабных пленок толщиной в несколько сотен или даже десятков нанометров. Методики анализа данных наноиндентирования таких наномасштабных объектов отсутствуют. Поэтому исследование механических свойств наномасштабных пленок SiC на Si является актуальным.

Диссертационная работа Гращенко А.С. посвящена экспериментальному исследованию механических характеристик тонких наномасштабных пленок SiC, AlN, GaN и Ga₂O₃, осажденных на подложке кремния Si, представляющих собой весьма сложные системы для наноиндентирования, поскольку твердая и жесткая пленки находятся на мягкой подложке. Для многослойных структур эффективная податливость (в направлении нормали к слоям) представляет собой взвешенную сумму податливостей отдельных слоев. То есть складываются обратные значения модулей Юнга, что приводит к тому, что извлечь информацию о деформационных характеристиках жесткой пленки на эластичной подложке максимально сложно. Малая толщина исследуемых слоев и пористая структура Si под

пленкой SiC лишь усугубляет ситуацию, поскольку для изучения механических свойств таких наносистем необходимо использовать нестандартные методы. Разработка абсолютно новой методики анализа данных наноиндентирования твердых наномасштабных пленок на мягком и пористом основании определяет актуальность исследования.

Так же актуальность темы определяется тем, что основное внимание в работе уделено получению новых справочных данных по механическим и деформационным характеристикам ряда абсолютно новых материалов, а именно пленок SiC, синтезированных на Si оригинальным методом согласованного замещения атомов и слоев перспективных широкозонных полупроводников, таких как AlN, GaN и β -Ga₂O₃, сформированных на гибридных подложках нано-SiC/Si.

Структура и содержание диссертации. Диссертационная работа А.С. Гращенко состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 129 наименований.

Во введении обоснована актуальность актуальности темы, показана теоретическая и практическая значимость работы, научная новизна.

В первой главе представлено описание экспериментальной техники наноиндентирования и особенности ее использования для случая измерения твердости и модуля упругости тонкой пленки, лежащей на подложке. Приведены основные источники ошибок экспериментальных данных, возникающих при наноиндентировании в нанометровом масштабе и методы их учета. Выполнен обзор перспективных методик анализа данных наноиндентирования, как для объемных материалов, так и для системы тонкая пленка на подложке. Представлены теоретические и эмпирические модели описания эффективных параметров твердости и модуля упругости системы пленка-подложка в зависимости от глубины отпечатка. Описана оригинальная методика синтеза наномасштабных эпитаксиальных слоев SiC на кремниевых подложках с помощью согласованного замещения атомов внутри матрицы Si.

Во второй главе представлены результаты наноиндентирования монокристаллических пластин SiC политипа 4H-SiC, Si с

кристаллографическими направлениями (001), (011) и (111) без отклонения от базовой плоскости и гибридных подложек нано-SiC/Si, синтезированных методом согласованного замещения атомов на пластинах Si с ориентацией (001), (011) и (111). Приведены данные наноиндентирования монокристаллической пластины SiC со стороны Si и C-полярных граней. Показано, что полярность поверхности кристалла SiC существенно влияет на характер начального этапа деформации. Показано, что значения твердости и модуля упругости пластин Si разных кристаллографических направлений, типов проводимости, способов и концентрации легирования могут существенно отличаться. Получены экспериментальные зависимости эффективного модуля упругости и микротвердости гибридных подложек нано-SiC/Si(001) и нано-SiC/Si(111), синтезированных методом согласованного замещения атомов. По данным моделирования определены значения модуля упругости и микротвердости наномасштабных слоев SiC. Для гибридной структуры нано-SiC/Si(011) приведен сравнительный анализ деформационных свойств нано-SiC/Si(011) и исходной пластины Si(011). Показано, что модуль упругости вблизи поверхности, среднее контактное давление и микротвердость гибридной подложки нано-SiC/Si(011) на 15-20% меньше, чем у исходной пластины Si. Проведен анализ начального этапа наноиндентирования гибридных структур нано-SiC/Si(001) и нано-SiC/Si(111) и определены значения модуля упругости вблизи поверхности.

В третьей главе приведены данные наноиндентирования гетероструктур AlN/SiC/Si, GaN/SiC/Si и GaN/AlN/SiC/Si. Для всех гетероструктур проанализирован начальный этап наноиндентирования и определены значения модуля упругости вблизи поверхности. Получены экспериментальные зависимости эффективных значений твердости и модуля упругости от глубины отпечатка и найдены параметры твердости и модуля упругости поверхностных слоев гетероструктур AlN/SiC/Si, GaN/SiC/Si и GaN/AlN/SiC/Si. По данным атомно-силовой микроскопии были зарегистрированы и определены размеры трещин в слое GaN, сформированные в процессе наноиндентирования. По размерам трещин

рассчитаны значения вязкости разрушения пленки GaN, сформированной на гибридной подложке nano-SiC/Si с буферным слоем AlN. Отдельно с помощью метода склерометрии проведены измерения твердости структуры nano-SiC/Si и пленки AlN, выращенной на гибридной подложке nano-SiC/Si.

В четвертой главе приведены исследования структурных и механических характеристик эпитаксиальных слоев β -Ga₂O₃, выращенных на пленках SiC, синтезированных методом согласованного замещения атомов на Si с ориентацией (001), (011) и (111). С помощью атомно-силовой микроскопии получены изображения поверхности слоев β -Ga₂O₃, рассчитана шероховатость и описаны характерные структурные особенности. Методом электронной сканирующей микроскопии сняты торцевые изображения гетероструктур β -Ga₂O₃/SiC/Si и определены толщины слоев β -Ga₂O₃. Методом наноиндентирования измерен ряд параметров пленок β -Ga₂O₃, в том числе значения твердости и модуля упругости. Приведены результаты квантово-химического моделирования упругих свойств кристаллических структур β -Ga₂O₃ для кристаллографических направлений $\langle 100 \rangle$, $\langle 010 \rangle$ и $\langle 001 \rangle$. При помощи численных методов квантовой химии вычислены тензор упругости и тензор податливости кристалла β -Ga₂O₃, обладающего моноклинной симметрией. Показано, что результаты моделирования методами квантовой химии хорошо соответствуют экспериментальным данным, полученным методом наноиндентирования, что свидетельствует о том, что упругопластические свойства пленок β -Ga₂O₃, выращенных на подложках Si с буферным слоем SiC близки к упругопластическим свойствам объемных кристаллов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена и апробирована новая аппроксимационная модель, адекватно описывающая деформационные свойства наномасштабных двухслойных пленок на подложке.
2. Впервые, на примере пленок SiC на Si продемонстрировано, что метод наноиндентирования может быть использован для анализа

деформационных характеристик алмазоподобных слоев толщиной в несколько нанометров, лежащих на более мягком пористом основании.

3. Впервые методом наноиндентирования были измерены механические свойства наномасштабных пленок SiC, синтезированных методом согласованного замещения атомов внутри матрицы Si, для трех основных кристаллических плоскостей (100), (110) и (111).
4. Впервые, методом наноиндентирования измерены параметры твердости и модуля упругости поверхностных слоев полупроводниковых гетероструктур AlN/SiC/Si, GaN/SiC/Si и GaN/AlN/SiC/Si, выращенных на структурах нано-SiC/Si, синтезированных методом согласованного замещения атомов.
5. Разработана новая методика, позволяющая визуализировать остаточные механические напряжения в прозрачном и полупрозрачном кристалле вблизи отпечатка, оставленного в результате механического воздействия.
6. Впервые получены экспериментальные данные о структурных характеристиках и упругопластических свойствах эпитаксиальных слоев β -Ga₂O₃, сформированных на слоях SiC, синтезированных методом согласованного замещения атомов на пластинах Si с кристаллографической ориентацией (100), (110) и (111).

Достоверность результатов, представленных в диссертации Гращенко А.С., обеспечивается применением апробированных экспериментальных методик, соблюдением общепринятых стандартов в соответствии, с которыми работают данные методики и согласованием полученных результатов с литературными данными.

Автореферат соответствует содержанию диссертации и отражает основные результаты, представленные в ней.

Апробация. Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 12 печатных трудах, рекомендованных ВАК РФ или входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus. Результаты исследований докладывались автором на 12 международных и всероссийских научных конференциях.

Замечания по диссертационной работе:

1. Эксперименты выполнялись при фиксированной скорости наноиндентирования равной 1 мН/сек. Представляет интерес мотивация выбора указанного значения и чувствительность результатов определения твердости и упругих модулей к варьированию данного параметра.
2. При наноиндентировании в окрестности индентора реализуется многоосное напряженное состояние. Поэтому на значение эффективного упругого модуля *монокристаллических* образцов, измеряемого в направлении действия нагрузки, будут оказывать влияние упругие модули пленки и подложки в направлениях ортогональных действию нагрузки, а также остаточные напряжения, возникающие при нанесении пленки на подложку.
3. Оценка эффективных модулей упругости на основе уравнений (1.25) и (1.26) требует априорного знания коэффициентов Пуассона материала пленки, подложки и индентора. Актуален вопрос о влиянии погрешности в их задании на точность получаемых результатов определения эффективного упругого модуля E_{eff} .
4. На стр. 80 автор утверждает, что «в реальной ситуации однородных пленок толщиной порядка 100 нм и менее практически не существует, так как на границе раздела пленка-подложка образуются различные буферные или переходные слои, толщина которых, как правило, составляет десятки нанометров». В связи с этим возникает вопрос интерпретации полученных значений упругих модулей для подобного гетерогенного материала.
5. На Рисунке 3.12 показано «распределение механических напряжений», однако не указано, какая именно компонента или эквивалентная мера тензора напряжений имеется в виду.

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки работы, ценности полученных автором диссертации результатов, их достоверности и практической значимости.

Заключение по диссертации.

Диссертационная работа Гращенко А.С. представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Новые научные результаты, полученные диссертантом, представляют собой обобщение экспериментальных и модельных исследований, и направлены на решение важной научно-технической задачи по исследованию механических и деформационных характеристик структур нано-SiC/Si, синтезированных оригинальным методом согласованного замещения атомов и полупроводниковых гетероструктур, сформированных на гибридных подложках нано-SiC/Si.

Считаю, что диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук в соответствии с «Положением о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013, а Александр Сергеевич Гращенко заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 (ранее 01.02.04) – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент
к.ф.-м.н., доцент
ВШ "Механика и процессы управления"
Физико-механического института,
ФГАОУ ВО "Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого"

06.06.2022

195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29,
e-mail: semenov.artem@googlemail.com,
тел.: +7-(905)-272-11-88

Семенов А.С.

