

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Нестерова Дмитрия Николаевича **«Особенности электронно-энергетического строения двумерных и одномерных наноструктур кремния»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - «Физика конденсированного состояния».

В диссертации Нестерова Д.Н. проведены исследования электронного строения и фазового состава структур кремний-на-изоляторе (КНИ) и нанонитей кремния (НК) методами рентгеновской эмиссионной спектроскопии и спектроскопии края рентгеновского поглощения с использованием синхротронных источников.

Актуальность темы диссертации Нестерова Дмитрия Николаевича не вызывает сомнений по нескольким причинам. Во-первых, даже в хорошо изученном и давно известном материале таком, как кремний-на-изоляторе (КНИ), при исследованиях с использованием синхротронного излучения могут проявляться ранее не наблюдаемые эффекты или новые особенности в электронной структуре и электрических свойствах, определяемые методами формирования образцов. Во-вторых, результаты этих исследований дополняют фундаментальные знания о структурах кремний-на-изоляторе. В то же время сейчас активно исследуются одномерные наноструктуры кремния (нанонити кремния), ввиду их потенциально широкого применения в полупроводниковой электронике. Изучение влияния используемых подложек и выбранных методов на морфологию, электронную структуру, фазовый состав получаемых нанонитей безусловно является актуальным и важным для получения фундаментальных знаний об этом материале.

Диссертация состоит из четырех глав, изложена на 118 страницах, содержит 54 рисунка, 2 таблицы и список литературы из 165 наименований. Работа отличается структурированностью, ясностью изложения и грамотным описанием результатов и использованных методов.

Следует отметить, что автором были получены следующие **новые результаты**. Опираясь на экспериментальные данные рентгеновской спектроскопии и теоретические расчёты с помощью программного пакета Wien2k, использующего метод линейаризованных присоединенных плоских волн, была показана возможность уменьшения ширины запрещенной зоны в растянутом кремнии на 0,13 эВ. Исследования нанонитей кремния методами ультрамягкой рентгеновской эмиссионной спектроскопии и спектроскопии квантового выхода позволили определить зависимость морфологии и фазового состава нанонитей от выбранной подложки и времени травления. Представляет интерес анализ спектров XANES в зависимости от угла скольжения синхронизированного излучения по поверхности нанонитей кремния (стр.90-97)

В личном вкладе соискателя следует отметить участие в непосредственном получении ультрамягких эмиссионных рентгеновских спектров на лабораторном приборе РСМ-500 и спектров квантового выхода в составе научной группы при работе в международных синхротронных центрах. Анализ полученных экспериментальных и теоретических данных об электронном строении структур КНИ и нанонитей кремния, компьютерное моделирование с целью определения фазового состава в зависимости от способов формирования структур были проведены лично автором.

Научная и практическая значимость работы заключается в уникальности полученных результатов, которые могут быть использованы для дальнейшего исследования способов формирования КНИ структур и нанонитей кремния с заданными физическими и электрическими свойствами и электронным строением, а также для практического использования при разработке новых микроэлектронных приборов.

Достоверность и обоснованность изложенных в диссертации результатов и выводов подтверждается использованием современных неразрушающих методов исследования электронной структуры, в числе которых ультрамягкая рентгеновская эмиссионная спектроскопия, спектроскопия квантового выхода с ис-

пользованием синхротронного излучения. Многократная воспроизводимость экспериментальных данных, также указывает на их достоверность.

Замечания

1. Не вполне корректно называть кремниевые стержни, полученные металласистированным травлением «нанонитями», так как их толщина (100-300 нм) не соответствует критерию волны де Бройле.

2. В диссертации отмечается перспективность использования кремниевых нитей в фотонике, сенсорике, солнечной энергетике и т.д. В то же время для исследованных в диссертации структур такие исследования не проводились.

3. На основании теоретических расчётов в диссертации утверждается, что растяжение слоя кремния приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны, в то же время по экспериментальным измерениям валентной зоны и зоны проводимости ничего об изменении ширины запрещенной зоны не говорится.

4. При анализе атомной структуры образца HD-SiNW методами просвечивающей микроскопии и УМРЭС наблюдается некоторое расхождение о содержании нанокристаллов кремния в нитях, но в диссертации это не анализируется.

Изложенные замечания не уменьшают достоинств диссертационной работы Нестерова Д.Н. и не ставят под сомнения изложенные результаты и выводы. Результаты, полученные автором в работе, несомненно, найдут использование в дальнейших фундаментальных исследованиях структур КНИ и нанонитей кремния, а также в разработке перспективных полупроводниковых устройств. Стоит отметить, что диссертация Нестерова Д.Н. является законченным исследованием, имеющим научную и практическую ценность.

Работа была апробирована на нескольких международных, национальных школах, семинарах и конференциях. Результаты работы были изложены в 4 статьях в ведущих журналах из перечня ВАК, индексируемых в базах Scopus и Web of Science.

Таким образом, считаю, что диссертация «Электронно-энергетическое строение двумерных и одномерных наноструктур кремния» по своей актуальности и новизне, достоверности и совокупности полученных ре-

