

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. директора Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Института материаловедения
Хабаровского научного центра ДВО РАН,
доктор физико-математических наук,
профессор



В.Г. Заводинский

«17» февраля 2014 г.

О Т З Ы В

ведущей организации на диссертацию Безбабного Дмитрия Александровича
«Исследование формирования, структуры и свойств пленок
полупроводниковых силицидов кальция на Si (111)», представленной на
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 01.04.10 – физика полупроводников

Актуальность для науки и практики

В настоящее время повышенное внимание уделяется исследованию наноразмерных систем на основе силицидов, обладающих уникальными функциональными свойствами (оптическими, электрическими, термоэлектрическими), которые обусловлены проявлением различных квантово-механических эффектов. Среди широкого класса данных материалов для создания элементов современной электроники весьма перспективны полупроводниковые силициды кальция. Однако трудности получения силицидов определенного состава из-за узкой области гомогенности существования различных Ca-Si фаз и недостаточная изученность зависимостей их характеристик от условий эпитаксиального роста служат сдерживающим фактором к их широкому практическому применению. Безусловно, для более глубокого понимания процессов роста силицидных фаз на поверхности кремния и детального изучения физических свойств формируемых пленок требуются дополнительные экспериментальные исследования. Кроме того, в области развития нанотехнологий особое значение придается работам по

созданию полупроводниковых гетероструктур, поэтому получение и изучение структур Si/Ca₃Si₄/Si(111) и Si/Ca₂Si/Si(111) является ценным опытом для расширения знаний о свойствах таких систем и оценки возможности их дальнейшего использования в реальных устройствах. Вследствие этого актуальность диссертационной работы Безбабного Д.А., посвященной формированию полупроводниковых силицидов кальция Ca₂Si и Ca₃Si₄ в виде пленок и гетероструктур на поверхности кремниевых подложек, а также определению их оптических и электрических свойств, не вызывает сомнения.

Положения, выносимые на защиту, и сформулированные в диссертационной работе выводы обладают обоснованностью и достоверностью.

Основные научные результаты и их значимость для науки и производства

Основные результаты, полученные автором и имеющие большое значение для науки:

1. Определены условия формирования пленок силицидов кальция Ca₂Si и Ca₃Si₄ толщиной от 4 до 240 нм на подложках Si(111) 7×7 методом реактивной эпитаксии. Нанокристаллическая пленка Ca₂Si образуется при температуре 130°C в процессе осаждения кальция на предварительно сформированный слой аморфного кремния или тонкую пленку Mg₂Si, а поликристаллический силицид Ca₃Si₄ – при 500°C.

2. Установлено, что нанокристаллическая пленка Ca₂Si является непрямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны 0,68–0,70 эВ. Поликристаллическая пленка Ca₃Si₄, представляет собой непрямозонный вырожденный полупроводник с шириной запрещенной зоны 0,63 эВ, межзонными переходами 0,89 и 0,912 эВ с большой силой осциллятора и малым коэффициентом термо-ЭДС – 50–80 мкВ/град.

3. По данным спектроскопии комбинационного рассеяния света определено, что пленки Ca₃Si₄ характеризуются тремя интенсивными пиками 346, 388 и 416 см⁻¹ с малой полушириной, что доказывает высокую степень кристалличности системы. На КРС-спектрах Ca₂Si наблюдается слабый пик при 352 см⁻¹.

4. По данным *in situ* дифференциальной отражательной спектроскопии исследована температурная стабильность силицидов кальция. Установлено, что

пленка Ca_3Si_4 сохраняет свой состав во время отжига при 500°C в течение 30 минут, в то время как отжиг Ca_2Si пленок при 130°C приводит к частичному разложению силицида.

5 Сформированы двойные гетероструктуры $\text{Si}/\text{Ca}_3\text{Si}_4/\text{Si}(111)$ и $\text{Si}/\text{Ca}_2\text{Si}/\text{Si}(111)$ методами реактивной, молекулярно-лучевой и твердофазной эпитаксии кремния. Установлено, что в зависимости от толщины осажденного слоя кальция в данных системах формируются нанокристаллиты или сплошной слой Ca_3Si_4 , а рост кремния сопровождается выходом части нанокристаллов Ca_3Si_4 на поверхность. В структурах $\text{Si}/\text{Ca}_3\text{Si}_4/\text{Si}(111)$ при 5 К обнаружена слабая фотолюминесценция в диапазоне энергий фотонов 0,9–1,0 эВ.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты диссертации представляют интерес для развития представлений о процессах формированияnanoструктур на поверхности монокристалла кремния. Использованные в работе методики эпитаксиального роста пленок силицидов кальция Ca_3Si_4 и Ca_2Si , а также гетероструктур на их основе могут быть использованы в научно-производственных организациях, на предприятиях электронной промышленности, разрабатывающих и создающих фото- и термоэлектрические преобразователи, компоненты электронных систем. Полученные данные могут быть полезны студентам и аспирантам физических специальностей, изучающим курсы «Физика твердого тела», «Физические основы нанотехнологий» и др.

Замечания

Следует отметить некоторые недостатки, которые касаются в основном оформления диссертационной работы:

1. В некоторых утверждениях нарушена логическая связь, например «чем больше уменьшение ДОС сигнала, тем больше уменьшилась толщина пленки» (стр. 82), хотя должно быть наоборот.
2. На стр. 71 указывается, что «отношение интенсивностей Оже-спектров $\frac{I_{\text{Si}}}{I_{\text{Ca}}} = 1.78 \dots$ затем увеличивается до двух, что соответствует фазе Ca_2Si »,

однако согласно представленному выражению оно должно характеризовать соединение CaSi_2 .

3. Температурные зависимости коэффициента термо-ЭДС, изображенные на рис. 4.11 и 4.12, можно было объединить и показать на одном рисунке для удобства сравнения.

4. В тексте диссертации встречаются формулировки, которые не очень понятны, например, «состав изображений, полученных для пиков 389 см^{-1} и 416 см^{-1} , совпадает на 90–95%», «оба эти пика и маленький третий» (стр. 102) и т.д.

Заключение

В целом, диссертационная работа Безбабного Д.А. представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу на актуальную тему и соответствует специальности 01.04.10 – физика полупроводников. Отмеченные недостатки не влияют на полноту и достоверность полученных данных, основных выводов. Работа отвечает требованиям ВАК, а ее автор Безбабный Дмитрий Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Диссертация заслушана и обсуждена на открытом семинаре лаборатории функциональных материалов и покрытий ФГБУН Института материаловедения ХНЦ ДВО РАН «3» февраля 2014 г.

Заведующий лабораторией
функциональных материалов и покрытий
ФГБУН Института материаловедения
Хабаровского научного центра
ДВО РАН, к.ф.-м.н.

Пячин Сергей Анатольевич