

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ МАГНЕТОТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ТОНКОЙ ПЛЕНКИ CaSi НА Si(100)

Субботин Е.Ю.¹, Шевлягин А.В.¹, Балаган С.А.¹, Галкин К.Н.¹, Алексеев А.Ю.²

Институт автоматизируемой и процессов управления ДВО РАН¹

г. Владивосток, Российская Федерация

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники²

г. Минск, Республика Беларусь

Галкин Н.Г.¹ – док. физ.-мат. наук, профессор

Миас Д.Б.² – док. физ.-мат. наук, доцент

Аннотация. В работе исследован механизм транспорта в тонкой (130 нм) поликристаллической пленке CaSi на кремниевой подложке с ориентацией Si(100) в диапазоне температур 2-300 К. Низкотемпературные холловские и магнетотранспортные измерения показали, что пленка CaSi демонстрирует транспортные свойства, характерные для плохих металлов. В ней обнаружен гигантский магнеторезистивный эффект (ГМРЭ) до 4000% при температуре около 50 К и магнитном поле 8 Тл. Продемонстрирована линейная зависимость ГМРЭ от магнитного поля и аномалия удельного сопротивления, связанная с переходом Лифшица или образованием волны зарядовой плотности, а также обнаружены осцилляции продольного магнетосопротивления при температурах 2-15 К, что указывает на нетривиальные квантовые транспортные свойства пленки.

Ключевые слова. Моносилицид кальция, поликристаллическая пленка, кремний, холловские и магнетотранспортные измерения, зонная структура, гигантский магнеторезистивный эффект, волна зарядовой плотности, квантовый транспорт.

Силициды кальция являются экологически чистыми материалы и занимают особое место среди силицидов щелочноземельных металлов. Это связано в первую очередь с широким набором свойств силицидов кальция от полупроводниковых [1] до полуметаллических [2,3]. Это может привести к их широкому использованию в различных областях техники и электроники. Однако транспортные свойства полуметаллических силицидов исследованы недостаточно [4,5], а магнетотранспортные свойства при низких температурах и сильных магнитных полях не исследовались.

Рост пленки моносилицида кальция (CaSi) на подложке Si(100) проводился в сверхвысоковакуумной (СВВ) камере установки OMICRON Compact с базовым вакуумом $1 \cdot 10^{-10}$ Торр, оснащенной анализаторами ДМЭ и ЭОС/ХПЭЭ, блоком молекулярно-лучевых источников кремния (Si) и кальция (Ca) для проведения осаждения Ca и Si на кремниевую подложку. Рост пленки CaSi осуществлялся при осаждении Si и Ca при температуре 330 °С с последующим отжигом при $T=330$ °С в течение 20 минут. Скорости осаждения Ca и Si, откалиброванные по кварцевым датчикам толщины, составляли 2,5 нм/мин и 0,8 нм/мин, соответственно. Толщина выращенной пленки составила 130 нм. Морфология образца исследовалась методом атомной силовой микроскопии (АСМ) на сканирующем зондовом микроскопе Solver P47 сразу после выгрузки образца из СВВ-камеры. Для электрических измерений на пленку осаждались и вжигались при $T=330$ °С алюминиевые контакты в геометрии Ван дер Пау. Методики транспортных и магнетотранспортных измерений в системе Teslatron с системой охлаждения замкнутого цикла до температуры 2 К и в магнитных полях до 8 Тл описаны в работе [5]. Расчеты электронной зонной структуры и вклада спин-орбитальной связи выполнены с помощью метода самосогласованных полнопотенциальных линейаризованных дополненных плоских волн (FLAPW) в его скалярно-релятивистской версии с использованием пакета WIEN2k [6].

По данным АСМ выращенная при 330 °С пленка имела упорядоченную структуру с шероховатостью $\sigma_{rms}=3.12$ нм, состоящую из взаимно перпендикулярных ограниченных зерен. Рентгеноструктурный анализ показал, что фазовый состав и кристаллическая структура выращенной

пленки [7] представляют собой поликристаллическую фазу CaSi с преобладающей ориентацией (220) и некоторой долей нанокристаллических включений Ca₂Si.

Транспортные измерения при нулевом магнитном поле показали сложное поведение удельного сопротивления выращенной пленки CaSi в зависимости от температуры (рисунок 1а). Обнаружены три области с различным поведением: (1) полуметаллический характер зависимости в диапазоне температур 50 - 300 К с пиковой аномалией удельного сопротивления около 150 К; (2) полупроводниковый тип зависимости при T= 25 - 50 К с соответствующим раскрытием запрещенной зоны около 36 мэВ (рисунок 1б); (3) металлический характер проводимости от 25 К до 2 К с плато удельного сопротивления. Приложение перпендикулярного магнитного поля приводит к дальнейшему расширению запрещенной зоны на втором участке, которая достигает 47 мэВ при 8 Тл (рисунок 1б). Оно также сопровождается появлением осцилляций магнитосопротивления (МС) в диапазоне (2 - 15) К (плато) (рисунок 1а). Анализ зависимости относительного магнитосопротивления (рисунок 1в) показал его умеренный рост от единиц до пяти сотен процентов в магнитных полях 1 – 8 Тл в диапазоне температур 180-70 К, соответствующем широкому максимуму продольного сопротивления (рисунок 1а). При температурах 33 – 60 К наблюдался резкий рост относительного магнитосопротивления от 1000% до 4000% в магнитном поле 8 Тл, что соответствует гигантскому магнитосопротивлению в пленке CaSi состоящей из немагнитных материалов.

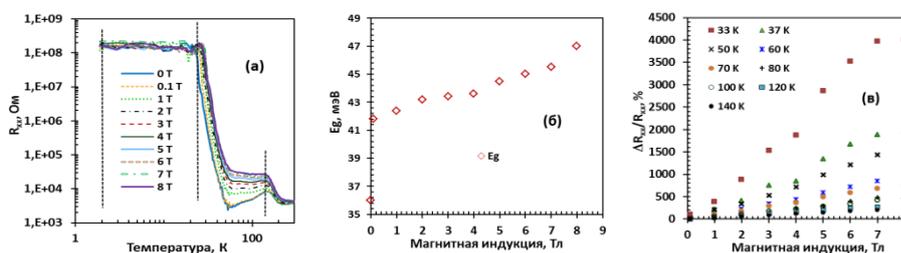


Рисунок 1 – (а) Температурные зависимости продольного сопротивления R_{xx} в геометрии Ван дер Пау при различных магнитных полях от 0 Тл до 8 Тл; (б) Зависимость ширины запрещенной зоны в диапазоне температур 25-50 К от магнитной индукции; (в) зависимость относительного магнитосопротивления от магнитной индукции при температурах от 33 К до 140 К

Холловские измерения в диапазоне температур 2-300 К при магнитном поле 0.5 Тл позволили в рамках стандартной модели рассчитать эффективные концентрации (рисунок 2а) и подвижность (рисунок 2б) носителей. Однако из-за того, что в пленке наблюдался гигантский магнеторезистивный эффект, измерения на структуре Ван дер Пау не могли компенсировать различные градиентные явления. Ситуация также осложняется тем, что CaSi является по данным наших теоретических расчетов полуметаллом с вкладом от двух типов носителей в карманах около уровня Ферми. А учет

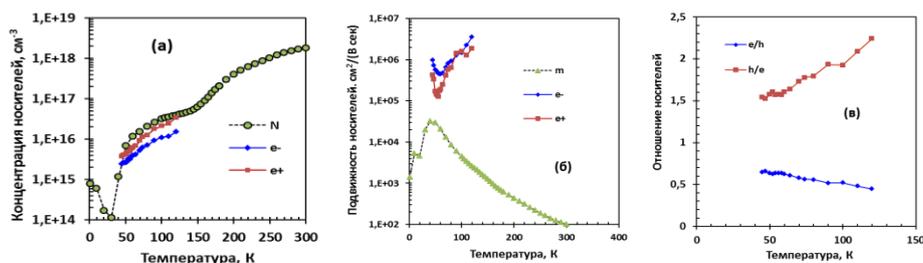


Рисунок 2 – Температурные зависимости (а) эффективной концентрации носителей и (б) эффективной подвижности носителей, рассчитанные из данных холловских измерений при магнитной индукции 0.5 Тл. На рисунках 1(а,б,в) представлены данные для концентраций электронов и дырок, их подвижностей и отношения концентрации дырок к электронам и электронов к дыркам при различных температурах, рассчитанные в рамках двухзонной модели из данных магнитосопротивления от магнитного поля и температуры

спин-орбитального взаимодействия показал наличие тривиальной топологии псевдометалла или металла с зазором и довольно низкой плотностью состояний на уровне Ферми. Поэтому из данных по магнитосопротивлению в рамках двухзонной модели были разделены вклады дырок и электронов в диапазоне 45-120 К, оценены их концентрации (рисунок 2а), подвижности (рисунок 2б) и отношения их концентраций (рисунок 2 в). Установлено, что во всем оцененном диапазоне температур дырки имеют большую концентрацию и меньшую подвижность, чем электроны в пленке CaSi. При этом оба типа носителей имеют высокую подвижность (до 3×10^6 см²/(В×сек)). Сопоставление с холловскими данными (рисунок 2а) показывает хорошее совпадение в выделенном диапазоне температур.

Таким образом, пленка CaSi демонстрирует свойства транспорта плохих металлов. Однако гигантский MR до 4000% при 50 К и 8Т, его линейная зависимость от поля, аномалия удельного сопротивления, связанная с переходом Лифшица или образованием волны зарядовой плотности, а

также плато удельного сопротивления указывают на нетривиальные квантовые транспортные свойства, которые не наблюдаются для объемного монокристалла CaSi.

Эти исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-02-00123_а и гранта РФФИ-БРФФИ № 20-52-00001_Бел_а.

Список использованных источников:

1. *Calculated quasiparticle and optical properties of orthorhombic and cubic Ca₂Si / S. Lebegue // Phys. Rev. B, – 2005. - V. 72. – P. 085103(1-9).*
2. *Chemical bond and electronic states in calcium silicides: Theory and comparison with synchrotron-radiation photoemission / O. Bisi [et al.] // Phys. Rev. B, – 1989. – V. 40. – P. 10194-1202.*
3. *Electronic and structural properties of CaSi₂ / S. Fahy [et al.] // Phys. Rev. B, – 1990. – V. 41. – P. 7587-7593.*
4. *Low temperature properties of calcium mono- and disilicides / M. Affronte [et al.] // J. Alloys and Compounds, – 1998. – V. 274. – P. 68-75.*
5. *Conducting CaSi₂ transparent in infra-red / N.G. Galkin [et al.] // J. Alloys and Compounds, - 2019. – V. 770. – P. 710-720.*
6. *P. Blaha, [et al.], WIEN2k, An Augmented Plane Wave + Local Orbitals Program for Calculating Crystal Properties (Karlheinz Schwarz, Tech. Universität Wien, Vienna, 2001).*
7. *A low temperature growth of Ca silicides on Si(100) and Si(111) substrates: formation, structure, optical properties and energy band structure parameters / N.G. Galkin [et al.] // J. Alloys and Compounds, - 2020, - V. 813, - P. 152101(1-12).*