

УДК 538.915

МАГНИТОПРОВОДИМОСТЬ ПЛЕНОК МОНОСИЛИЦИДОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Д. А. Подрябинкин, В. В. Мельникова,
А. Г. Трафименко, А. Л. Данилюк

Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники, г. Минск

Введение. В настоящее время исследования топологических материалов перспективны не только из-за интересной и новой физики, но и в плане их использования для разработки элементной базы информатики на принципиально иных физических эффектах, обусловленных необычными электронными свойствами таких материалов [1, 2]. Эксперименты показывают, что в низкотемпературной области зачастую проводимость двумерных пленок многих топологических полуметаллов пропорциональна логарифмическому вкладу температуры.

Многие моносилициды, такие как CrSi, FeSi, MnSi, OsSi, RhSi, RuSi и CoSi кристаллизуются в кубической структуре типа B20, в которой отсутствует инверсия, и относятся к классу полуметаллов Дирака или Вейля, что делает их перспективными для спинтроники и спиновой калоритроники. Формирование тонких эпитаксиальных плёнок силицидов переходных металлов (Fe, Co, Mn) на монокристаллических подложках с изменяемой толщиной (3–30 нм) перспективно для создания нового поколения элементной базы обработки информации на квантовом уровне так как, во-первых, данные силициды переходных металлов полностью совместимы с кремниевой технологией и могут быть эпитаксиально выращены на соответствующих кремниевых

подложках, поскольку обладают кубической решеткой. Для объёмных монокристаллов CoSi, FeSi, CrSi и тройных сплавов $\text{Fe}_x\text{Co}_{1-x}\text{Si}$ был подтвержден вклад топологических особенностей как в электрическом транспорте, так и в оптических свойствах [3, 4].

Модель. В данной работе рассмотрена модель $2D$ -магнитопроводимости моносилицида переходного металла, обладающего топологическими свойствами, с точки зрения теории разупорядоченных металлических систем в предположении, что в магнитном поле несколько явлений вносят вклад, среди которых эффект спинового расщепления $\delta\sigma_{ss}$, эффект кулоновского взаимодействия (обмен и вклад Хартри) $\delta\sigma_c$ и эффект слабой локализации $\delta\sigma_{WL}$ [5], т. е.

$$\sigma(T, B) = \sigma(T, B = 0) + \delta\sigma_{ss} + \delta\sigma_c + \delta\sigma_{WL}, \quad (1)$$

где B – индукция магнитного поля, T – температура.

Поправка на спиновоe расщепление для $2D$ проводимости в присутствии магнитного поля с индукцией B определяется в зависимости от температуры, времени рассеяния импульса на случайном потенциале τ , фактора Хартри F . Поправка от кулоновского взаимодействия между носителями заряда определена для разупорядоченных систем в зависимости от температуры, фактора Хартри, коэффициента диффузии D , индукции магнитного поля B , температуры Дебая T_D и химического потенциала электронной системы μ с учетом кулоновского отталкивания и притяжения между электронами посредством фононной системы [5, 6]. Для поправки на слабую локализацию/антилокализацию для $2D$ электронных систем используем модифицированную модель HLN (Hikami–Larkin–Nagaoka), которая часто применяется для интерпретации экспериментальных данных по измерению проводимости топологических изоляторов и полуметаллов [7]. Величину этой поправки запишем с учетом

неупругого рассеяния, определяемого временем дезафировки τ_ϕ , безразмерного параметра λ , описывающего относительную силу скалярного и спин-орбитального связанного беспорядка, а также среднего времени между двумя событиями рассеяния τ_e , определяемого вкладом спин-орбитального рассеяния, плотностью состояния на уровне Ферми и степенью беспорядка. Для моделирования магнитопроводимости с помощью данного подхода необходимо определить модельные параметры F , τ , τ_e , D , μ , T_D , τ_ϕ , λ . В данном случае оценим их значения из экспериментальных данных по измерению магнитопроводимости в FeSi (таблица) [8].

Результаты и обсуждение. Из полученных результатов следует, что суммарная поправка к магнитопроводимости обеспечивает ее рост в магнитом поле. Снижение фактора Хартри из-за обменного взаимодействия говорит о уменьшении вклада Хартри с ростом температуры.

Таблица

Параметры для расчета квантовых поправок

T , К	D , см ² /с	F	τ_ϕ , пс	τ , пс	λ	τ_e , пс
2,0	10,0	0,98	25,0	2,0	0,4	0,3
10,0	12,0	0,543	1,05	1,0	0,5	0,1

Это значит, что при $T = 2$ К имеется кулоновское короткодействующее взаимодействие, которое переходит в дальнодействующее при $T = 10$ К, т. е. происходит ослабление короткодействующего взаимодействия с повышением температуры, сопровождающееся ростом длины статического экранирования $1/\kappa$. Как известно, рост длины экранирования сопровождается увеличением сечения кулоновского рассеяния, что способствует снижению степени электрон-электронного притяжения.

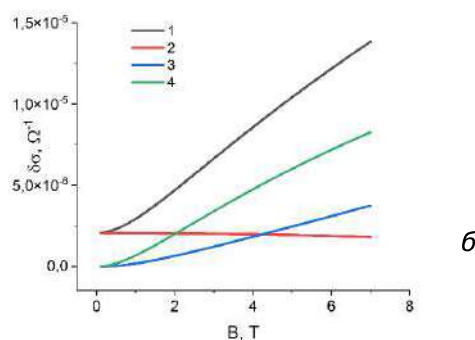
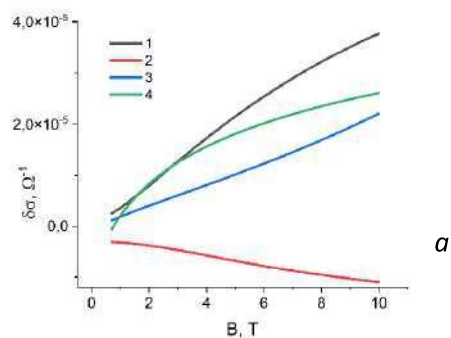


Рис. 1. Поправки к магнитопроводимости при $T = 2$ К (а) и $T = 10$ К (б): 1 – суммарная поправка, $\delta\sigma$; 2 – поправка от эффекта спинового расщепления $\delta\sigma_{ss}$; 3 – кулоновского взаимодействия $\delta\sigma_c$; 4 – слабой локализации/антилокализации $\delta\sigma_{WL}$

Действительно поправка $\delta\sigma_c$ уменьшается с ростом температуры (рис. 1), несмотря на некоторое увеличение коэффициента диффузии D . Время дефазировки τ_ϕ с ростом температуры снижается в 25 раз и в качестве оценки получим, что $\tau_\phi \sim 1/T^2$. Такая температурная зависимость времени дефазировки предположительно говорит о вкладе в скорость дефазировки ($1/\tau_\phi$) как электрон-электронного рассеяния

($1/\tau_{e-e}$), так и электрон-фононного взаимодействия.

Использование модифицированной модели HLN [7] для топологических материалов показало, что поправка к магнитопроводимости за счет эффекта слабой локализации/антилокализации $\delta\sigma_{WL}$ совпадает с аналогичной поправкой, рассчитанной по традиционной модели HLN. В этом случае достигается совпадение коэффициента диффузии и времени дефазировки двух моделей. Различие состоит в том, что вклад спин-орбитального рассеяния в модифицированной модели HLN определяется силой спин-орбитального рассеяния (spin-orbit scattering strength) λ . Полученные значения параметра $\lambda = 0,4\text{--}0,5$ коррелируют с эффектом антилокализации. Время τ_e – среднее время между двумя событиями рассеяния, определяемое вкладом спин-орбитального рассеяния, плотностью состояния на уровне Ферми и степенью беспорядка. Как видно из таблицы, на порядок меньше среднего времени рассеяния на случайном потенциале, τ . Это подтверждает принятое предположение о том, что в данном случае беспорядок может вносить существенный вклад в проводимость пленки моносилицидов переходных металлов.

Таким образом, в результате проведенного моделирования поправок к магнитопроводимости моносилицидов переходных металлов показано, что теория разупорядоченных электронных систем дает вполне адекватные оценки их транспортных параметров и может применяться для интерпретации экспериментальных данных по измерению магнитосопротивления в таких материалах.

Литература

1. Wang A. Q. Topological Semimetal Nanostructures: From Properties to Topotronics [Текст] / A. Q. Wang [et al.] // ACS Nano. – 2020. – Vol. 14, No. 4. – P. 3755–3778.
2. Yan B. Topological materials: Weyl semimetals [Текст]

/ B. Yan, C. Felser // Annual Review of Condensed Matter Physics. – 2017. – Vol. 8. – P. 337–354.

3. Pshenay-Severin D. A. Electronic structure and thermoelectric properties of transition metal monosilicides [Текст] / D. A. Pshenay-Severin [et al.] // Journal of Electronic Materials. – 2018. – Vol. 47, No. 6. – P. 3277–3281.

4. Schnatmann L. Signatures of a charge density wave phase and the chiral anomaly in the fermionic material cobalt monosilicide CoSi [Текст] / L. Schnatmann [et al.] // Advanced Electronic Materials. – 2019. – Vol. 6, No. 2. – P. 1900857.

5. Lee P. A. Disordered electronic systems [Текст] / P. A. Lee, T. V. Ramakrishnan // Rev. Mod. Phys. – 1985. – Vol. 57. – P. 287–337.

6. Altshuler B. L. Electron–Electron interactions in Disordered Systems [Текст] / B. L. Altshuler, A. G. Aronov // Modern Problems in Condensed Matter Sciences. – 1985. – Chapter 1. – Vol. 10. – P. 1–153.

7. Liu W. E. Weak Localization and Antilocalization in Topological Materials with Impurity Spin-Orbit Interactions [Текст] / W. E. Liu, E. M. Hankiewicz, D. Culcer // Materials. – 2017. – Vol. 10, No. 7. – P. 807.

8. Galkin N. G. Structural, Transport, and Magnetic Properties of Ultrathin and Thin FeSi Films on Si(111) [Текст] / N. G. Galkin [et al.] // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2024. – Vol. 18. – P. 372–383.