

КОНВЕРСИЯ СПИНОВОГО ТОКА В ЗАРЯДОВЫЙ В ОДНОМЕРНОМ МАГНИТНОМ ПОЛУМЕТАЛЛЕ ВЕЙЛЯ

Силивонец А.С., Данилюк А.Л.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Данилюк А.Л. – канд. физ.-мат. наук

Аннотация. В данной работе с помощью модели на основе полуклассического уравнения Больцмана получены результаты моделирования конверсии спинного тока в зарядовый в гетероструктуре, состоящей из ферромагнитного металла и одномерного магнитного полуметалла Вейля, для баллистического и диффузионного режимов переноса заряда. Установлено, что эффективность преобразования спина в зарядовый ток в целом снижается с ростом отношения длины полуметалла Вейля к длине свободного пробега электронов в нем.

Ключевые слова: спинный ток, конверсия, полуметалл Вейля, проводимость.

Актуальность исследований свойств топологических материалов, перспективных 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, является приоритетной. В последние годы топологические полуметаллы открыли новые возможности для детектирования спинных токов. Среди них полуметаллы Вейля являются привлекательными, которые демонстрируют множество экзотических свойств переноса носителей заряда, таких как отрицательное магнитосопротивление, нелокальный транспорт и квантовые осцилляции. Недавно внимание стало уделяться магнитным вейлевским полуметаллам (MWSM), которые являются идеальными платформами для изучения крупномасштабного квантового аномального эффекта Холла. MWSM со спонтанно нарушенной симметрией обращения времени могут иметь наименьшее количество узлов Вейля и собственный магнетизм. Они позволяют применять внешнее магнитное поле для регулировки узлов Вейля и связанных с ними эффектов, что обеспечивает обширные приложения.

Преобразование между спинным и зарядовым током может использоваться для считывания и обнаружения информации в спинтронных устройствах. Спинный эффект Холла (SHE) и обратный спинный эффект Холла (ISHE) обеспечивают способ достижения эффективного обнаружения спинного тока с помощью измерения электрических токов. SHE и ISHE, где инжектированный продольный зарядовый ток может быть преобразован в поперечный спинный ток и наоборот из-за спин-орбитальной связи, обычно реализуются в тяжелых металлах, таких как Pt. Обратный эффект Эдельштейна (IEE) проявляется в двумерном электронном газе (2DEG) с сильной интерфейсной спин-орбитальной связью Рашбы, где накопление спина в 2DEG может вызвать поток заряда. ISHE и IEE были применены для обнаружения спинного тока в различных гетеропереходах с помощью измерений электрического токопереноса, таких как $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}/\text{Pt}$, Ag/Bi .

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что существует конверсия заряда в спин в немагнитных полуметаллах Вейля, таких как TaAs и WTe_2 , которая может быть полезна в спинтронной памяти и логических схемах. Недавно конверсия спина в заряд была также теоретически предсказана в MWSM [1]. Однако влияние размера образца и процессов рассеяния электронов на конверсию спина в заряд в MWSM изучено недостаточно. Для решения этой задачи в [2,3] предложено использовать полуклассическое уравнение Больцмана для моделирования спин-зарядовой конверсии в вертикальной гетероструктуре, состоящей из ферромагнитного металла и MWSM в баллистическом и диффузионном режимах. При спинной накачке и ферромагнитном резонансе происходит накопление спинов на интерфейсе, что приводит к несбалансированному спин-зависимому распределению электронов и дополнительно генерирует зарядовый ток в MWSM из-за внутренней блокировки спинного импульса.

В данной работе получены результаты моделирования значений проводимости и токов в одномерной (1D) модели магнитного полуметалла Вейля [3]. Для нормировки расчетов вводится параметр $\alpha = L_x/l_f$, где L_x – длина проводника, l_f – длина свободного пробега электрона. Поскольку электрический ток I постоянен вдоль направления x , его величина вычисляется, задавая $x = L_x/2$, что дает следующее выражение [2]

$$I = \frac{2e}{h} \int v_x g \left(k_x, x = \frac{L_x}{2} \right) \left(-\frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon_k} \right) dk_x = G^{1D} (V_L - V_R), \quad (1)$$

где

$$G^{1D} = G_0^{1D} \frac{2}{2 + \alpha} \quad (2)$$

проводимость одномерного MWSM, $G_0^{1D} = \frac{N_{ch}e^2}{h} = 7,727 \cdot 10^{-5}$ 1/Ом при $N_{ch} = 2$ с учетом спинового вырождения, e – элементарный заряд, h – постоянная Планка, v_x – скорость электронов в направлении x , k_x – волновое число электронов, f_0 – равновесная функция распределения Ферми-Дирака, ϵ_k – энергия электрона. Электрический ток I пропорционален разности потенциалов ($V_L - V_R$) на MWSM, что является проявлением калибровочной инвариантности.

В баллистическом пределе при $L_x \ll l_f$,

$$G^{1D} = G_0^{1D}, \quad (3)$$

что согласуется с формулой Ландауэра-Буттикера. В диффузионном пределе, когда $L_x \gg l_f$,

$$G^{1D} = G_0^{1D} \frac{2l_f}{L_x} = \frac{4\sigma}{L_x k_F}, \quad (4)$$

где σ – Друде проводимость MWSM, k_F – волновой вектор Ферми электронов.

График зависимости G^{1D} от значения α показан на рисунке 1.

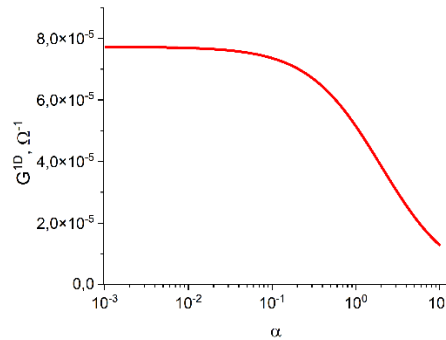


Рисунок 1 – График зависимости G^{1D} от значения α

Полученные зависимости значения тока при изменении значения α для падения потенциала на MWSM $\Delta V = V_L - V_R \{-1; -0,6; -0,3; 0,3; 0,6; 1\}$ В показаны на рисунке 2.

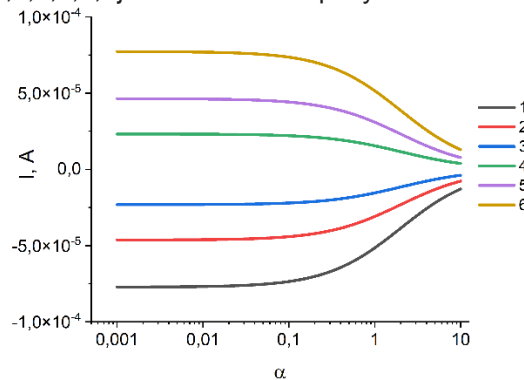


Рисунок 2 – Зависимости значений тока I от α при различных $\Delta V = V_L - V_R$: $\Delta V = -1$ В (кривая 1), $-0,6$ В (кривая 2), $-0,3$ В (кривая 3), $-0,3$ В (кривая 3), $0,3$ В (кривая 4), $0,6$ В (кривая 5), $1,0$ В (кривая 6).

Полученные результаты по моделированию конверсии спинового тока в зарядовый в одномерном полуметалле Вейля позволили установить, что эффективность преобразования спина в зарядовый ток в целом снижается с ростом отношения длины образца MWSM к длине свободного пробега электронов. В баллистическом режиме ток постоянен и максимален при условии, что параметр $\alpha < 0,1$. При $\alpha > 0,1$ наблюдается переход в диффузионный режим, при котором ток начинает снижаться с ростом α . Снижение тока ускоряется при $\alpha \gg 2$, когда его величина становится пропорциональной $1/\alpha$. Полученные зависимости предоставляют дополнительные средства для контроля и управления преобразованием спинового тока в зарядный в топологических полуметаллах. Полученные результаты предназначены для разработки запоминающих устройств на основе 1D полуметаллах Вейля.

Список использованных источников:

1. Zhang, S.S.-L. Spin-to-Charge Conversion in Magnetic Weyl Semimetals / S.S.-L. Zhang [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2019. – Vol. 123, Iss. 18. – P.187201.
2. Ge, Y.F. The effect of size on spin-to-charge conversion in the magnetic Weyl semimetal / Y.F. Ge [et al.] // Physics Letters A. – 2022. – Vol. 429. – P.127953.
3. Geng, Hao Unified semiclassical approach to electronic transport from diffusive to ballistic regimes / Hao Geng [et al.] // Chin. Phys. B. – 2016. – Vol. 25, No. 9. – P.097201.