

Влияние сингулярностей в спектре спиновых волн на эффективность генерации спинового тока бегущими ПМСВ в структурах ЖИГ-платина

М.Е. Селезнев, Ю.В. Никулин, В.К. Сахаров, Г.М. Дудко, С.Л. Высоцкий, А.В. Кожевников, Ю.В. Хивинцев, Ю.А. Филимонов

¹Саратовский филиал ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Аннотация: приводятся результаты исследования эффекта спиновой накачки бегущими дипольными и дипольно-обменными поверхностными магнитостатическими волнами (ПМПВ) в структурах железоиттриевый гранат – платина (ЖИГ/Pt). Показана корреляция между сингулярностями Ван Хофа в спектре ПМСВ пленки ЖИГ и эффективностью генерации спинового тока бегущей ПМСВ в структуре ЖИГ/Pt. Обнаруженные особенности накачки бегущими ПМСВ могут быть использованы для эффективного преобразования спина в заряд в устройствах магнонной спинтроники.

Ключевые слова: спинтроника, магноника, структуры ЖИГ-платина, спиновые волны

Магнонная спинтроника — это область спинтроники, связанная с устройствами и технологиями обработки информации, использующими спиновый ток, переносимый магнонами [1]. Одной из важнейших структур для этой области являются бислои железо-иттрий-гранат-платина (ЖИГ/Pt), в которых движущиеся заряды заменены динамическими объектами в виде когерентных и некогерентных спиновых волн (СВ). За счет обменного и спин-орбитального взаимодействий электроны проводимости в Pt связаны с локализованными спинами в ЖИГ. Такая связь за счет спинового эффекта Холла позволяет, с одной стороны, возбуждать СВ [2,3] и управлять их распространением [4], а с другой стороны, за счет обратного спинового эффекта Холла (ОСЭХ) детектировать [2] как сами СВ, так и результат их интерференции [5].

Проблема эффективного преобразования спинового тока в электрический ток в структурах ЖИГ-Pt одна из важнейших для магнонной спинтроники. Эффективность преобразования обычно характеризуется величиной электрического напряжения U , генерируемого за счет ОСЭХ в пленке Pt при возбуждении спиновой подсистемы пленки ЖИГ. Для накачки спинов через интерфейс ЖИГ/Pt можно использовать бегущую СВ. В экспериментах по накачке бегущими СВ плотность магнонного спинового тока J_S через поперечное сечение S пленки ЖИГ можно связать с потоком СВЧ-мощности P спиновых волн $J_S \sim P \approx |\vec{m}|^2 v_g S$, где $|\vec{m}|$ и v_g — соответственно амплитуда и групповая скорость СВ. Часть J_S^p тока J_S , закачиваемая через интерфейс, определяется процессами электрон-магнонного рассеяния на границе ЖИГ/Pt, вероятность которых пропорциональна плотности состояний СВ в спектре магнитная пленка. С этой точки зрения, частоты f^* в спектре СВ, соответствующие сингулярностям ван Хофа в плотности состояний магнонов и где групповая скорость мала $v_g(f^*) \rightarrow 0$ [6], могут представлять особый интерес для создания эффективная генерация спинового тока.

Отметим, что в спектре дипольных поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ), распространяющихся в тангенциально намагниченной ферромагнитной пленке, частоты f^* соответствуют [7] длинноволновой ($k \rightarrow 0$) f_0 и коротковолновой ($k \rightarrow \infty$) f_s границам спектра, где k — волновое число вдоль плоскости пленки. Дополнительные частоты f^* сингулярностей Ван Хофа в спектре ПМСВ могут

появляться на частотах резонансного взаимодействия с обменными объемными модами (ОМ) пленки, имеющими волновое число по толщине пленки d , равное $k_{\perp,N} = \pi N/d$, где N – номер моды [8]. В случае $k \ll k_{\perp,N}$ спиновый ток, переносимый парциальной обменной объемной волной, направлен почти перпендикулярно интерфейсу ЖИГ/Pt (см. цветную вставку к рис.(а), что может способствовать росту нормальной к интерфейсу составляющей $J_{S,\perp}^p$ плотности спинового тока J_S^p , накачиваемого ПМСВ через интерфейс. В типичной планарной геометрии измерений ЭДС за счет обратного спинового эффекта Холла отмеченный рост компоненты спинового тока $J_{S,\perp}^p$ будет сопровождаться ростом электрического тока J_c^{ISHE} , текущего в плоскости пленки перпендикулярно направлению намагниченности,

$$J_c^{ISHE} \sim |J_{S,\perp}^p| \cdot [n \times \sigma],$$

где n и σ — соответственно единичные векторы вдоль нормали к границе раздела ЖИГ/Pt и поляризации спинового тока.

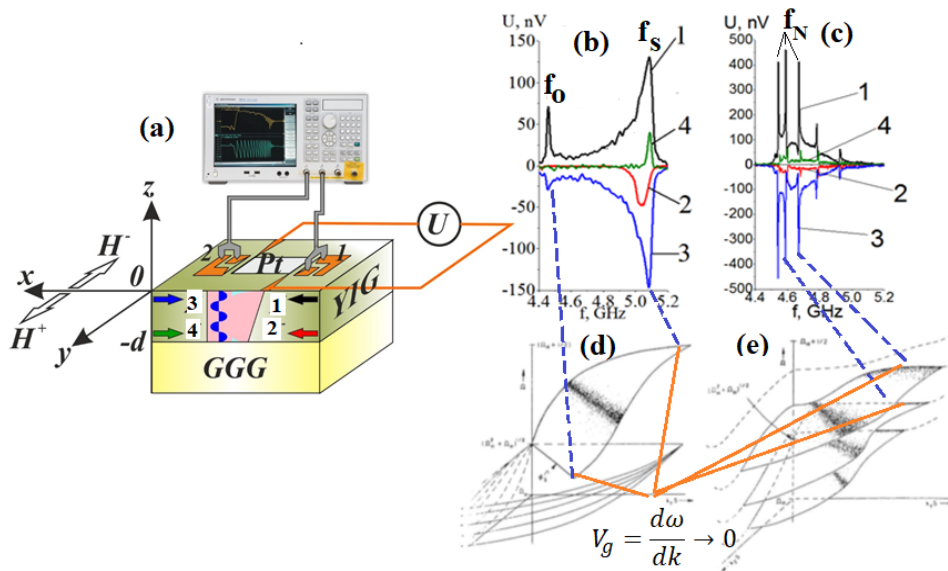


Рисунок 1. (а) показана исследуемая структура и схема эксперимента. Числами 1 и 2 обозначены входной и выходной преобразователи ПМСВ. Положением цветных стрелок 1-4 вблизи границ пленки ЖИГ $z=0$ и $z=-d$ обозначают положения максимумов амплитуды ПМСВ, распространяющихся в пленке ЖИГ при возбуждении антеннами 1 или 2 для случаев, когда внешнее магнитное поля направлено вдоль H^+ (стрелки 1,4) или противоположно H^- (стрелки 2,3) оси Oy. Цветными вставками схематично показано распределение парциальных волн, которые формируют дипольно-обменную ПМСВ, распространяющуюся в пленке ЖИГ: розовый цвет характеризует распределение по толщине пленки ЖИГ дипольной ПМСВ, синим и бирюзовым цветом показано распределение объемной и поверхностной обменных спиновых волн. Рисунки (b) и (c) иллюстрируют типичный вид частотной зависимости ЭДС генерируемой в структурах ЖИГ-платина за счет обратного спинового эффекта Холла в случае когда накачка осуществляется преимущественно дипольной ПМСВ (на примере структуры YIG(8 μ m)/Pt(8nm)) и гибридной, дипольно-обменной ПМСВ (на примере структуры YIG(0.9 μ m)/Pt(8nm)). Кривые 1-4 на рисунках (b) и (c) отвечают генерации ЭДС ПМСВ прижатых к разным поверхностям пленки ЖИГ и для двух направлений магнитного поля, что отражают стрелки 1-4 на Рис. (а). Результаты приведены для поля $H=943$ Э. Рисунки (c) и (d) дисперсионные поверхности для чисто дипольных и гибридных дипольно-обменных волн. Красными линиями показано положение частот f^* , где $v_g(f^*) \rightarrow 0$ и следует ожидать возникновения сингулярностей ван Хова в спектре магнонов

Нами исследован эффект генерации ЭДС за счет обратного спинового эффекта

Холла в структурах ЖИГ/Pt на основе эпитаксиальных пленок ЖИГ толщиной от 0,9 до 14 мкм. Пленки платины толщиной 8-10 нм осаждались на поверхность пленки ЖИГ магнетронным распылением. Далее с помощью литографии и ионного травления формировались микрополоски из пленки платины шириной 200 μm и длиной 200-800 μm . Затем с помощью взрывной фотолитографии и магнетронного распыления формировались медные антенны толщиной 300 нм, шириной 4 μm и длиной 200 μm с контактными площадками для посадки микрозондов. Одновременно с антеннами спиновых волн изготавливались контакты к пленке платины. Схема эксперимента представлена на рис.1 (а). На рис. 1 (b) показана типичная частотная зависимость ЭДС за счет обратного спинового эффекта Холла $U(f)$ для преимущественно дипольной ПМСВ с типичной дисперсией, показанной на рис.1 (d). В этом случае в зависимости $U(f)$ можно обнаружить два четких экстремума на частотах f_0 и f_s .

Для структур ЖИГ/Pt на основе достаточно тонкой пленки ЖИГ (как правило толщиной $d \leq 8 \mu\text{m}$) резонансное усиление ЭДС происходит на частотах, соответствующих резонансному взаимодействию ПМСВ с обменными толщинными модами в пленке ЖИГ, и отражает рост нормальной к границе раздела ЖИГ/Pt составляющей плотности спинового тока, а также плотности состояний в спектре спиновых волн, см. рис.1 (c) и (e).

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-00500)**.

Список литературы

1. A. Chumak, V. Vasyuchka, A. Serga, et al. Magnon Spintronics // Nature Phys. – 2015.-Vol. 11.-P. 453–461.
2. Y. Kajiwara, K. Harii, S. Takahashi, S. et al. Transmission of electrical signals by spin-wave interconversion in a magnetic insulator // Nature.-2010.-Vol. 464.-P. 262–266.
3. M. Collet, X. de Milly, O. d’Allivy Kelly, et al.. Generation of coherent spin-wave modes in yttrium iron garnet microdisks by spin–orbit torque. // Nat Commun.-2016.-Vol. 7.-P. 10377.
4. M. Evelt, V. E. Demidov, V. Bessonov, et al. High-efficiency control of spin-wave propagation in ultra-thin yttrium iron garnet by the spin-orbit torque. //Appl. Phys. Lett.-2016.-Vol. 108.-P. 172406.
5. M. Balinskiy, H. Chiang, D. Gutierrez, et al. Spin wave interference detection via inverse spin Hall effect.// Appl. Phys. Lett.-2021.-Vol. 118.- P. 242402.
6. L. van Hove. The Occurrence of Singularities in the Elastic Frequency Distribution of a Crystal.// Physical Review.-1953.-Vol. 89.-P. 1189/
7. R. Damon, J. Eshbach, Magnetostatic modes of a ferromagnet slab. //J. Phys. Chem. Solids.-1961.-Vol. 19.-P. 308–320.
8. R. E. De Wames, T. Wolfram. Dipole-Exchange Spin Waves in Ferromagnetic Films. // Journal of Appl. Phys. -1970.-Vol. 41.-P. 987-993.