

Структуры со спиновой поляризацией в микроэлектронике и нанофотонике

Х.Л. Бхатта, М.К. Погодаева, Е.П. Кожина, С.А. Бедин,
С.С. Косолюбов, С.В. Левченко, В.П. Драчев*

Сколковский Институт Науки и Технологий, Москва

E-mail: v.drachev@skoltech.ru

DOI:10.31868/RFL.2024.135-136

Структуры со спиновой поляризацией хорошо изучены для применений в микроэлектронике [1-5]. Эффекты гигантского магнито-сопротивления, магнитного туннелирования, переноса магнитного момента электронными спинами, управление магнетизацией переносом вращательного момента спин-поляризованным током нашли свое применение как в традиционных магнитных дисках, так и интегральных масштабируемых элементах памяти. Теоретический, экспериментальный и технологический задел микроэлектроники позволяет интерпретировать результаты аналогичных эффектов в нанофотонике, плазмонике и интегральной фотонике [6-8]. В докладе обсуждаются результаты полученные для оптических и магнитных свойств димеров магнитных наночастиц с позиций теории устройств микроэлектроники.

Фундамент спин-поляризованных систем, модель Мотта, предполагает, что в магнитных металлах существуют два, в значительной степени, независимых спиновых канала проводимости [1]. Вероятность рассеяния с переворотом спина невелика, а скорости рассеяния и следовательно проводимости для каналов, имеющих противоположные спины, существенно различаются. Значительная разница в проводимости двух независимых каналов признана основной причиной гигантского магнитосопротивления в слоистой структуре, составленной из двух магнитных материалов разденных немагнитным металлом [2]. Проводимость и обменная взаимодействие двух ферромагнетиков, разделенных туннельным барьером, может меняться под действием спин-поляризованного тока [3]. Шкала динамической инерционности магнетизации в таких системах находится в фемтосекундной области [4]. Компания Samsung Electronics объявила о начале массового производства своей первой встраиваемой магниторезистивной оперативной памяти, выполненной как продолжение электрода полевого транзистора в тех же размерах что и электрод [5]. Магниторезистивный эффект, лежащий в ее основе, предполагает высокую масштабируемость и обеспечивает рекордные технические характеристики. Магнитная оперативная память с переносом спина и соответственно вращательного момента спин-поляризованным током между двумя магнитными материалами разделенными потенциальным барьером образованным тонким слоем диэлектрика. Это энергонезависимая память с энергопотреблением, близким к нулю, что является основным преимуществом перед накопителями на основе заряда (память на основе полевых транзисторов с плавающим затвором). Обычная магниторезистивная оперативная память использует магнитные поля для перехода активных элементов между состояниями.

Эксперименты показывают острый плазмонный резонанс для изолированных однодоменных наночастиц Co [6-8]. Однако плазмонный резонанс исчезает, если изолированные частицы формируют небольшие скопления из двух-трех частиц. Измерения намагниченности с помощью системы SQUID показывают суперпарамагнитные свойства наночастиц Co при комнатной температуре, что

указывает на однодоменную структуру. Температурная зависимость намагниченности показывает температуру блокирования, которая зависит от объема частиц данного размера. Как бы то ни было, зависимость намагниченности от поля при блокирующей температуре и ниже имеет гистерезисный характер. Сдвиг петли гистерезиса, охлажденной до 10 К при напряжении +1 Тл, и противоположный сдвиг для образца, охлажденного при -1 Тл, позволяет контролировать уровень окисления наночастиц. Результаты по оптическим спектрам соответствуют частицам без оксидной оболочки. Качество плазмонного резонанса примерно такое же, как и для наночастиц золота, которые имеют резонанс в зеленом спектральном диапазоне. Наночастицы Со защищены от агрегации благодаря поверхностно-активным веществам, триоктилфосфину и олеиновой кислоте. Данные о динамическом рассеянии света показывают средний размер, близкий к среднему размеру на изображениях просвечивающего электронного микроскопа. Чтобы инициировать образование димеров, на раствор гексана Со наночастиц в кварцевой кювете воздействовали постоянным магнитным полем мощностью 130 мТл и ультразвуком [6]. В экспериментах исследовалось взаимодействие наночастиц Со, разделенных тонкой оболочкой из поверхностно-активного вещества. После 1 ч “агрегации” измеряются динамические распределения по размерам светорассеяния и спектры поглощения. Динамическое рассеяние света, показывает увеличение размера гидродинамических частиц с 8,7 до 12-13 нм, что соответствует скоплениям в среднем из двух частиц. Резонансный пик плазмона в поглощении уменьшается. После 2,5-часовой обработки ультразвуком в магнитном поле пик плазмона исчез полностью. Примечательно, что последующая обработка ультразвуком без внешнего магнитного поля приводит к разделению агрегированных частиц и восстановлению плазмонного резонанса. Таким образом, агрегация, вызванная воздействием магнитного поля и ультразвука, является обратимым процессом. В докладе обсуждаются возможные механизмы наблюдаемых эффектов.

Литература

- [1] N.F. Mott, Proc. *Royal Soc.* 156, 368 (1936); N.F. Mott, *Electrons in transition metals*. Adv. Phys. 13, 325 (1964).
- [2] M.N. Baibich, et al, *Phys. Rev. Lett.* **61**, 2472 (1988).
- [3] J. C. Slonchevskii, *Phys. Rev. B*, **39**, 6995-7002 (1989).
- [4] Zai-Dong, Li et al. *Acta Physica Sinica* (2023): n. pag.
- [5] <https://news.samsung.com/ru/samsung-electronics-starts-commercial-shipment-of-eMRAM-product-based-on-28nm-FD-SOI-process> (14-03-2019).
- [6] H. L. Bhatta, A. E. Aliev, and V. P. Drachev, *Sci. Rep.* **9**, 1 (2019).
- [7] V. P. Drachev, M. K. Pogodaeva, S. V. Levchenko, A. E. Aliev, *Spin-Polarized Plasmonics: Fresh View on Magnetic Nanoparticles*, Springer Nature Switzerland AG 2021, E. Kamenetskii (ed.), Chirality, Magnetism and Magnetoelectricity, Topics in Applied Physics 138,
- [8] M. K. Pogodaeva, S. V. Levchenko, and V. P. Drachev, *Phys. Rev. B* **107**, 045113 (2023).