Электрическое управление p - d обменным взаимодействием в гибридной структуре ферромагнетик-полупроводник

Коренев В.Л.¹, Калитухо И.В.¹, Акимов И.А.^{1,2}, Сапега В.Ф.¹, Жуков Е.А.^{1,2}, Kirstein E.², Кен О.С.¹, Kudlacik D.², Karczewski G.³, Wiater M.³, Wojtowicz T.³, Ильинская Н.Д.¹, Лебедева Н.М.¹, Комиссарова Т.А.¹, Яковлев Д.Р.^{1,2}, Кусраев Ю.Г.¹, Bayer M.²

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

² Technische Universität Dortmund, 44227, Germany, Dortmund, Emil-Figge-Straße, 50

³ Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, 02668 Poland, Warsaw, aleja Lotników, 32/46

DOI 10.34077/Semicond2019-291

Электрический контроль ферромагнетизма в нанометровом масштабе – одна из важных задач, решение которой необходимо для интеграция магнетизма в полупроводниковую электронику [1]. В этом отношении привлекательными являются гибридные структуры ферромагнетик-полупроводник. Такие структуры могут объединять свойства изолированных компонентов: магнитный порядок ферромагнетика (ФМ) и гибкость электрического управления полупроводника.

В данной работе продемонстрировано электрическое управление эффективным обменным взаимодействием в гибридной структуре, состоящей из ферромагнитного слоя Co и полупроводниковой CdTe квантовой ямы (КЯ), разделенных тонким немагнитным CdMgTe барьером. Ранее [2] в подобных структурах был обнаружен существенно новый, дальнедействующий ферромагнитный эффект близости, обусловленный эффективным p - d обменным взаимодействием между тяжелыми дырками, локализованными на акцепторах в КЯ, и магнитными ионами ФМ. Обмен происходит через испускаемые ферромагнетиком фононы, эллиптически поляризованные вблизи магнон-фононного резонанса, и является фононным аналогом динамического эффекта Штарка.

Гибридные структуры Co/CdMgTe/CdTe/CdMgTe с электрическими контактами поперек слоя CdTe КЯ исследованы методами стационарной и время-разрешенной спектроскопии фотолюминесценции (ФЛ), а также методом неупругого рассеяния света с переворотом спина. ФМ индуцирует спиновую поляризацию дырок на акцепторах в близлежащей КЯ (эффект близости), что, в свою очередь, приводит к циркулярной поляризации ФЛ. Показано, что степень циркулярной поляризации ФЛ максимальна в режиме плоских зон (при напряжении + 0.5 В в пропускном направлении) и составляет ~2%. Приложение напряжения в заперном направлении уменьшает величину эффекта (до 0.25% при –3 В). Аналогичная зависимость от напряжения наблюдается и для амплитуды насыщения циркулярной поляризации, измеренной методом время-разрешенной спектроскопии ФЛ. Метод неупругого рассеяния света с переворотом спина позволяет непосредственно измерить константу эффективного p - d обменного взаимодействия [3], которая также зависит от приложенного к структуре напряжения: она составляет 150 мкэВ вблизи нуля вольт и уменьшается до 10 мкэВ при –3 В. Показано, что величина константы обменного взаимодействия определяется изгибом зон в области КЯ и максимальна в случае плоских зон. Таким образом, эффективное магнитное поле обменного взаимодействия ~ 2.5 Тл может включаться и выключаться путем приложения напряжения ~1 В, что соответствует электрическому полю ~103 В/см. Физический механизм электрического контроля связан с изменением расщепления между уровнями тяжелых и легких дырок в КЯ при изменении изгиба зон во внешнем электрическом поле. Тем самым величина расщепления может быть подстроена по энергии магнон-фононного резонанса в ФМ, что приводит к максимальной связи в режиме плоских зон.

[1] F. Matsukura et al., *Nature Nanotech.*, **10**, 209 (2015).

[2] V.L. Korenev et al., *Nature Physics*, **12**, 85 (2016).

[3] I. A. Akimov et al., *Phys. Rev. B*, **96**, 184412 (2017).