

Спин-зависимые явления в наноструктурах и спинтроника

Ю. Г. Кусраев

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия

Последнее десятилетие ознаменовалось огромной активностью исследований в области физики спинов в конденсированной среде. Мотивацией этих исследований явилась не только фундаментальная физика [1], сама по себе интересная и увлекательная, но и перспектива практического использования спиновых степеней свободы для создания устройств нового поколения, комбинирующих стандартную микроэлектронику со спин-зависимыми явлениями [2]. Такие устройства — их называют устройствами спиновой электроники — в которых информация переносится не зарядом электрона, а его спином, должны включать возможность а) создания неравновесного спина, б) хранение и управления спином и в) детектирование конечного спинового состояния.

В докладе представлен краткий обзор наиболее важных на наш взгляд спин-зависимых явлений в наноструктурах, в частности, оптическая ориентация спинов, процессы спиновой релаксации, спиновый транспорт, спиновая инжекция, влияние внешних полей на спиновую релаксацию и т.д. Рассмотрены механизмы спиновой релаксации в полупроводниковых квантовых ямах и квантовых точках, приведены наиболее важные эксперименты по исследованию этих механизмов. Важным обстоятельством (в том числе в практическом аспекте) является возможность управления скоростью спиновой релаксации внешними полями. Существующие теоретические представления позволяют предсказать типы структур, которые позволяют получить максимально долгие времена спиновой релаксации. Экспериментально получены такие структуры и показано, как с помощью внешнего электрического поля можно регулировать скорость спиновой релаксации [3]. Рассмотрен механизм спиновой релаксации, обусловленный сверхтонким (контактным) взаимодействием электрона с ядрами решетки полупроводника [4] (актуального в квантовых точках и в случае электрона, локализованного на доноре), обсуждаются экспериментальные проявления этого механизма [5]. Эти исследования выполнены в основном методом оптической ориентации, который в настоящее время является наиболее удобным способом создания спиновой поляризации.

Наряду с оптическими способами создания неравновесной поляризации, очень важным в практическом плане является спиновая инжекция из ферромагнетика в полупроводник. Эта идея была предложена около 30 лет назад в теоретической работе Аронова и Пикуса [6], однако экспериментально была

реализована недавно. В связи с тем, что эффективность спиновой инжекции в такой гетероструктуре невысока из-за большой разницы в проводимостях ферромагнетика и полупроводника, актуальным является синтез ферромагнитных полупроводников с высокой температурой Кюри ($T > 300$ К), совместимых с полупроводниковой технологией и желательно электрически управляемых. Разбавленные магнитные полупроводники (РМП) являются возможными кандидатами для этих целей.

Обсуждаются физические явления в РМП, т.е. твердых растворах полупроводников A_2MB_6 и A_3MB_5 , полученных путем частичного замещения катионных узлов полупроводников A_2B_6 и A_3B_5 магнитными атомами (как правило, атомами переходных элементов) $M=Fe, Co, Cr, Mn$ и др. В случае полупроводников A_2B_6 — это изоэлектронное замещение и соответствующие твердые растворы являются бездефектными полупроводниками с превосходными оптическими характеристиками и отличаются большим разнообразием магнитных свойств. Приведены сведения о магнитных (магнитополяронных, парамагнитных, спин-стекольных) и оптических свойствах РМП. Обсуждаются особенности спин-зависимых явлений в одиночных квантовых точках на основе твердых растворов A_2MnB_6 . В случае A_3MnB_5 , магнитные атомы входят в кристалл в качестве акцепторов. Дырки, поставляемые в зону этими акцепторами, переносят ферромагнитное взаимодействие между локализованными спиновыми моментами. Чтобы ввести достаточное количество ионов марганца в решетку GaAs требуется низкотемпературная ($T \sim 250^\circ$ С) технология МЛЭ, которая приводит к высокой плотности дефектов. Интерес к подобным системам сильно возрос 10 лет назад после открытия ферромагнетизма с относительно высокой температурой Кюри [7].

Рассмотрены различные устройства, работа которых основана на спин-зависимых явлениях.

Литература

- [1] *Оптическая ориентация* под ред. Б. П. Захарчени и Ф. Майера, (Наука, 1989).
- [2] S. A. Wolf, *et al.* Science, **294**, 1488 (2001).
- [3] O. Z. Karimov, *et al.* Phys. Rev. Lett. **91**, 246601 (2003).
- [4] I. A. Merkulov, Al. L. Efros and M. Rosen, Phys. Rev. B **65**, 205309 (2002).
- [5] P.-F. Braun, *et al.* Phys. Rev. Lett. **94**, 116601 (2005).
- [6] А. Г. Аронов, Г. Е. Пикус, ФТП, **10**, 1177 (1976).
- [7] H. Ohno, *et al.* Appl. Phys. Lett., **69**, 363 (1996).