

Ядерная спиновая система полупроводника: термодинамика и спектр флуктуаций

К.В.Кавокин, лаб. Оптики спина СПбГУ

В силу слабой связи спинов ядер в твердом теле с кристаллической решеткой, ядерная спиновая система может быть охлаждена до очень низких температур, причём спиновая температура может быть как положительной, так и отрицательной. Выравнивание температур ядерной спиновой системы и кристаллической решётки происходит за время спин-решёточной релаксации T_1 , которое может достигать многих сотен секунд.

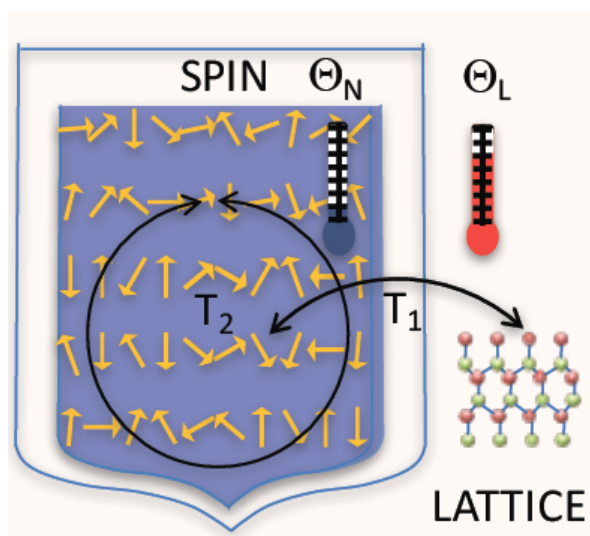


Рис.1. Ядерная спиновая температура устанавливается за время T_2 (порядка 100 микросекунд), а выравнивается с температурой решётки за время T_1 (порядка 100 секунд и дольше).

Спиновая температура определяет магнитную восприимчивость ядерной спиновой системы: при положительной спиновой температуре магнитные моменты ядер выстраиваются вдоль магнитного поля, а при отрицательной – навстречу ему. Полупроводниковые структуры представляют широкие возможности для поляризации спинов ядер электронами, спины которых можно ориентировать с помощью циркулярно поляризованного света (оптической накачки). Это позволяет легко достигать спиновых температур, на 5-6 порядков более низких по абсолютной величине, чем температура решётки. Однако применимость теории спиновой температуры к полупроводниковым структурам не была проверена прямым экспериментом (хотя имелось множество подтверждающих её косвенных данных). Разработанные в нашем коллективе методы невозмущающего оптического контроля ядерной намагниченности по Фарадеевскому вращению и спиновым шумам позволяют выполнять эксперименты по адиабатическому размагничиванию оптически накачанных ядерных спинов, измеряя ядерную намагниченность в реальном времени непосредственно в очень слабых внешних магнитных полях - порядка локальных полей, создаваемых магнитными моментами ядер друг на друге. Пример измеренной кривой адиабатического перемагничивания показан на рис.2. Она прекрасно согласуется с предсказаниями теории спиновой температуры, но локальные поля оказываются в несколько раз больше теоретически рассчитанных.

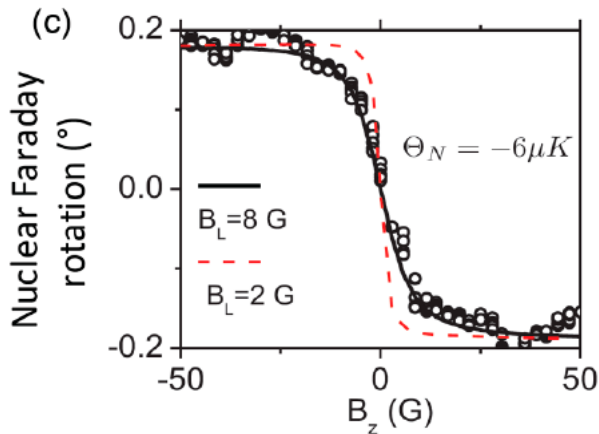


Рис.2. Перемагничивание ядерных спинов при

медленном (адиабатическом изменении магнитного поля), зарегистрированное с помощью Фарадеевского вращения в полупроводниковом микрорезонаторе. Сплошная линия – предсказание теории спиновой температуры. Θ_N – ядерная спиновая температура. Температура кристалла при этом равна 2K.

Ещё больше вопросов возникает при интерпретации спектральной плотности ядерных спиновых флуктуаций, которая может быть рассчитана из измеренных спектров отогрева ядерной спиновой системы переменным магнитным полем...

Ссылки по теме:

- 1) V.K.Kalevich, K.V.Kavokin, I.A.Merkulov, MR Vladimirova “Dynamic nuclear polarization and nuclear fields”, Chapter 12 in *Spin physics in semiconductors*, ed. by M.I.Dyakonov, 2-nd edition, pp 387-430, Springer 2017.
- 2) M Vladimirova, S Cronenberger, D Scalbert, II Ryzhov, VS Zapasskii, GG Kozlov, A Lemaître, KV Kavokin, “Spin temperature concept verified by optical magnetometry of nuclear spins”, *Physical Review B* 97 (4), 041301 (2018)
- 3) VM Litvyak, RV Cherbunin, KV Kavokin, VK Kalevich “Determination of the local field in the nuclear spin system of n-type GaAs” *Journal of Physics: Conference Series* 951 (1), 012006 (2018)