Применение спектроскопии отогрева для изучения флуктуаций ядерных спинов в полупроводниках

Чербунин Р.В.¹, Литвяк В.М.¹, Кавокин К.В.^{1,2}, Калевич В.К.^{1,2}

¹ СПбГУ, 198504, Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7/9

² ФТИ им. А. Ф. Иоффе, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

DOI 10.34077/Semicond2019-300

Известно, что ядра решётки многих полупроводников обладают ненулевыми магнитными моментами, сильно взаимодействующим между собой и слабо взаимодействующим с колебаниями решетки. Например, в арсениде галлия скорость диполь-дипольного и спин-решеточного взаимодействий ядер могут отличаться на шесть порядков. Сильное различие времен продольной и поперечной релаксации позволяет понижать температуру ядерной спиновой системы (ЯСС) до уровня микро-кельвин, когда сам кристалл находится при температуре жидкого гелия [1]. При этом резервуар энергии, который создаёт диполь-дипольное взаимодействие ядерных спинов, оказывается выведен из теплового равновесия с окружающей средой и способен либо поглощать энергию (при положительной спиновой температуре), либо отдавать её (при отрицательной спиновой температуре). При понижении ядерной спиновой температуры еще на порядок должен наблюдаться переход в спин-упорядоченное состояние, аналогичное упорядоченным состояниям ядерных спинов в металлах.

Термодинамическое равновесие внутри ядерной спиновой системы устанавливается за время порядка ста микросекунд. Это позволяет реализовать методику изучения флуктуаций ядерных спинов, основанную на измерении мнимой части её восприимчивости по изменению спиновой температуры при поглощении энергии переменного магнитного поля определенной частоты [2]. В данной работе была реализована методика спектроскопии отогрева ЯСС при ее оптическом охлаждении поляризованным светом. Поляризованное лазерное излучение ориентировало по спину электроны проводимости, которые создавали поток спина в ЯСС, находящуюся во внешнем магнитном поле. Поток спина в магнитном поле сопровождается потоком тепла в ЯСС или из ЯСС. Выбором длительности и знака циркулярной поляризации оптической накачки мы могли регулировать начальную спиновую температуру ядер объемного арсенида галлия в пределах от милликельвин до микро-кельвин. Следующие за этапом охлаждения этап отогрева переменным магнитным полем различной частоты и этап измерения ядерной спиновой температуры позволили получить спектры отогрева ядерных спинов в указанном интервале спиновых температур. Из полученных спектров, используя флуктуационно-диссипативную теорему, можно рассчитать спектральную плотность ядерных спиновых флуктуаций.

Полученные экспериментальные результаты показали, что в легированном арсениде галлия помимо пика поглощения, связанного с прецессией ядер в локальном поле, присутствует пик на примерно удвоенной частоте. Амплитуда пика и его ширина зависят от концентрации резидентных электронов. Предположительно, данный пик связан с переходами ядерных спинов с изменением магнитного квантового числа на 2, которые становятся разрешенными в присутствии электронов. Спектральная плотность ядерных спиновых флуктуаций в нулевом внешнем магнитном поле, спадающая на частотах диполь-дипольных взаимодействий (несколько килогерц), имеет также узкий пик неизвестной пока природы в области низких частот ($f < 100$ Гц).

[1] D. Paget, G. Lampel, B. Sapoval, V.I. Safarov. Low-field electron-nuclear spin coupling in gallium arsenide under optical pumping conditions. *Phys. Rev. B* **15**, 12 (1977).

[2] V.K. Kalevich, V.D. Kulkov, V.G. Fleisher. Optical cooling of the nuclear spin system of a semiconductor in conjunction with adiabatic demagnetization. *Bulletin of Academy of Science of the USSR, Physical Series*, V **46**, 70 (1982).