

Квантовые дефекты в алмазе и карбиде кремния

Г.В. Астахов

Физический институт, Университет г. Вюрцбург, Германия

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

Большинство квантовых систем теряют свои когерентные свойства при комнатной температуре. Поэтому точечные дефекты (центры окраски) в алмазе и карбиде кремния (SiC), которые обладают очень долгими временами квантовой когерентности, достигающими нескольких миллисекунд при условиях окружающей среды [1], открывают широкие возможности для практического применения различных квантовых технологий. Одним из наиболее изученных центров окраски является так называемый NV-дефект в алмазе, который возникает при удалении атома углерода из узла решетки и связывания образовавшейся вакансии (V) с атомом азота (N). В первой части лекции будет представлен метод оптически-детектированного магнитного резонанса (ОДМР), позволяющий инициализировать, манипулировать и считывать спиновое состояние одиночного NV-дефекта при комнатной температуре [2]. Этот метод может быть использован для реализации нового поколения сверхчувствительных наносенсоров, основанных на фундаментальных квантово-механических свойствах спиновых объектов в кристаллических матрицах и позволяющих детектировать магнитные [3], электрические [4] и температурные [5] поля с нанометровым пространственным разрешением. Одним из наиболее ярких примеров является детектирование одиночных ядерных спинов [6], что необходимо для реализации ядерного магнитного резонанса на одиночных молекулах с межатомным пространственным разрешением.

Во второй части лекции будут представлены оригинальные результаты по SiC. Известно около 250 различных кристаллических форм SiC, называемых политипами. Благодаря полиморфизму в этом материале существует порядка 1000 центров окраски с квантовыми свойствами, аналогичными NV-центрам алмаза [7]. Одним из таких центров является кремниевая вакансия. При облучении кристаллов SiC электронами или нейтронами концентрация этих центров варьируется на восемь порядков величины с 10^9 до 10^{16} см⁻³. Используя конфокальную микроскопию, можно изолировать одиночные кремниевые вакансии, которые служат стабильными источниками одиночных фотонов в ближнем инфракрасном диапазоне, работающими при комнатной температуре. В основном состоянии кремниевая вакансия имеет спин $S = 3/2$, что мо-

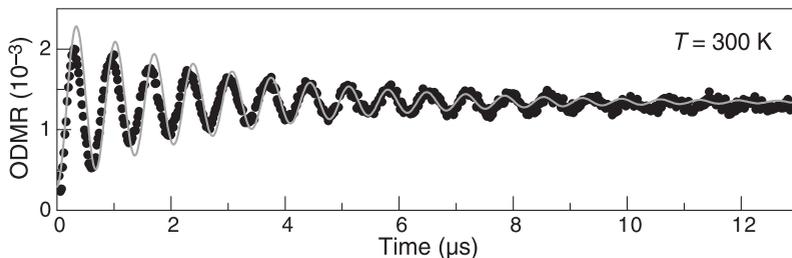


Рис. 1. ОДМР контраст в зависимости от длительности радиочастотного импульса. Период квантовых осцилляций равен 680 нс и неоднородное время спиновой когерентности составляет 3 мкс.

жет быть использовано для векторной магнетометрии [8], то есть реконструкции не только величины, но и направления вектора приложенного магнитного поля по отношению к оси симметрии кремниевой вакансии. Другой центр окраски, так называемая френкелевская пара (кремниевая вакансия, связанная с межузельным атомом кремния), обладает гигантским температурным сдвигом частоты магнитного резонанса [8]. Этот сдвиг более чем на порядок величины больше аналогичного сдвига для NV-центра, что делает френкелевскую пару в SiC привлекательной для измерения температуры. Следует отметить, что использование импульсных методик позволяет на несколько порядков повысить чувствительность квантовых сенсоров. На рисунке показаны осцилляции Раби, индуцированные радиочастотными импульсами в одной из кремниевых вакансий при комнатной температуре.

Литература

- [1] G. Balasubramanian, P. Neumann, D. Twitchen, *et al.*, *Nat. Mater.* **8**, 383 (2009).
- [2] A. Gruber, A. Dräbenstedt, C. Tietz, *et al.*, *Science* **276**, 2012 (1997).
- [3] J. M. Taylor, P. Cappellaro, L. Childress, *et al.*, *Nat. Phys.* **4**, 810 (2008).
- [4] F. Dolde, H. Fedder, M. W. Doherty, *et al.*, *Nat. Phys.* **7**, 459 (2011).
- [5] D. M. Toyli, C. F. de las Casas, D. J. Christle, *et al.*, *Proc. of the Nat. Academy of Sciences* **110**, 8417 (2013).
- [6] C. Müller, X. Kong, J. M. Cai, *et al.*, *Nat. Comm.* **5**, 4703 (2014).
- [7] H. Kraus, V. A. Soltamov, D. Riedel, *et al.*, *Nat. Phys.* **10**, 157 (2014).
- [8] H. Kraus, V. A. Soltamov, F. Fuchs, *et al.*, *Sci. Rep.* **4**, 5303 (2014).