

РЕЗОНАНСНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ЭЛЕКТРОННО-ЯДЕРНОЙ СПИНОВОЙ СИСТЕМЕ В КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ

М. С. Кузнецова

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

Огромная чувствительность регистрации ЯМР оптическими методами позволяет использовать их для исследования наноразмерных полупроводниковых структур, таких как квантовые ямы и квантовые точки, которые содержат относительно небольшое число ядер.

В докладе приводятся результаты наблюдения резонансов для ядерных переходов в самоорганизующихся (In, Ga)As/GaAs квантовых точках (КТ) в поперечном магнитном поле. Результаты получены с использованием метода селективной оптической накачки. Метод основан на возбуждении КТ светом с модуляцией циркулярной поляризации и регистрации изменений в ядерной поляризации, когда частота модуляции совпадает с частотой ядерного спинового перехода.

Анализ экспериментальных данных позволил идентифицировать резонансы, связанные с переходами между состояниями $\pm 1/2$, $\pm 3/2$, $\pm 5/2$ в изотопах индия, галлия и мышьяка, расщепленных магнитным полем и сильным квадрупольным взаимодействием.

Исследуемая гетероструктура представляет собой 20 слоев (In, Ga) As квантовых точек, помещенных между барьерами из GaAs. В каждой точке, в среднем, содержится по одному резидентному электрону. Структура была выращена методом молекулярно-лучевой эпитаксии на (100) GaAs подложке и отожжена при температуре 980 градусов Цельсия. Состояние ядерной поляризации фиксировалось по поляризации спина резидентного электрона, связанного с ядрами сверхтонким взаимодействием. Электронная поляризация детектировалась по степени отрицательной циркулярной поляризации (ОЦП) люминесценции, пропорциональной средней проекции спина электрона, на оптическую ось [1, 2]. Фотолюминесценция возбуждалась непрерывным излучением титан-сапфирового лазера, настроенного на энергию оптического перехода в смачивающем слое.

Для изучения электронно-ядерной спиновой динамики в КТ мы измеряли зависимость ОЦП от величины поперечного магнитного поля (кривая Ханле) при различных протоколах возбуждения. Оптическое возбуждение с одной поляризацией и постоянной амплитудой (CW) приводит к хорошо известной W-структуре в центральной части кривой Ханле, который является показателем динамической ядерной поляризации направленной вдоль внешнего магнитного поля [3]. Амплитудная модуляция возбуждающего света приводит к подавлению ядерной поляризации, и кривая Ханле имеет гладкую форму с шириной, контролируемой с помощью дефазировки светоиндуцированного спина электрона (e-пик).

На кривых Ханле, измеренных при модуляции поляризации возбуждения, появляются сильные дополнительные максимумы, положение которых зависит от частоты модуляции. Еще более сильные деформации возникают, когда радиочастотное (РЧ) поле прикладывается к образцу синхронно с модуляцией поляризации, как это показано на рис. 1. Синусоидальное РЧ-поле с магнитной компонентой в доли миллиТесла создавалось вдоль оптической оси с помощью катушек Гельмгольца, расположенных вблизи образца. РЧ-поле прикладывалось как в фазе, так и в противофазе с модуляцией поляризации. Как видно на рис. 1, синфазное РЧ-возбуждение значительно уширяет кривую Ханле, давая новые резонансы и гистерезисное поведение. Резонансы появляются далеко за пределами e-пика на кривой Ханле.

При приложении РЧ-поля в противофазе, кривая Ханле, напротив, резко сужается. Наблюдаемые резонансы связаны с ядерными переходами в исследуемых КТ, которые содержат несколько типов ядер: ^{69}Ga , ^{71}Ga , ^{75}As , ^{113}In и ^{115}In . При анализе резонансов, помимо зеемановского, учтено сильное квадрупольное расщепление ядерных спиновых состояний, которое происходит из-за градиента электрического поля, вызванного напряжениями в квантовых точках.

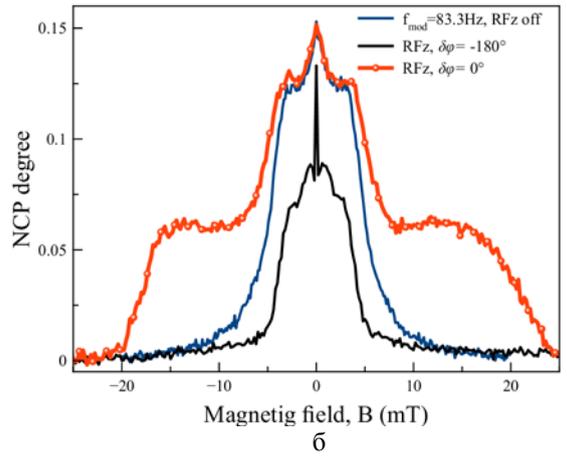
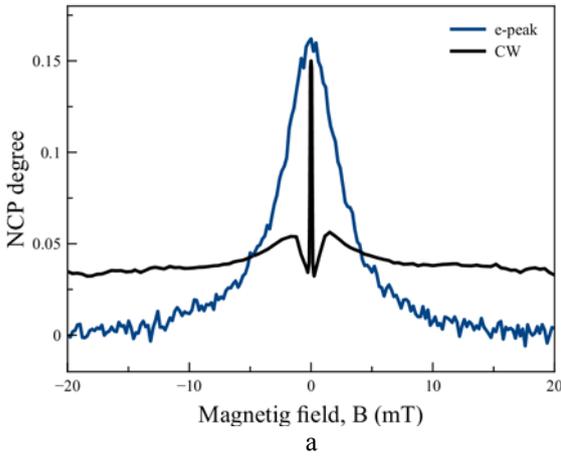


Рис. 1. Кривые Ханле, измеренные в режиме CW (черная кривая) и амплитудной модуляции возбуждения (e-пик) (а). Влияние РЧ-поля на кривые Ханле. Черная кривая измерена с приложением РЧ-поля в противофазе с модуляцией поляризации возбуждения. Красная кривая с символами измерена при приложении синфазного РЧ-поля. Синяя кривая измерена без РЧ-поля. $P_{\text{возб.}} = 0,5$ мВт, $T = 1,6$ К (б)

Пример анализа кривой Ханле приведен на рис. 2,б. Кривая Ханле была измерена при достаточно большой частоте модуляции и при приложении синфазного РЧ-поля.

На рис. 2,а представлены, экспериментально измеренные кривые Ханле, измеренные при разных частотах модуляции поляризации оптического возбуждения. Видно, что при увеличении частоты модуляции, дополнительные максимумы сдвигаются в сторону больших полей. При достаточно высокой частоте эти максимумы пропадают, но появляются новые вблизи нуля. На рис. 2,б представлен анализ кривой Ханле. Центральная часть полученной кривой моделируется резонансами $|1/2\rangle \leftrightarrow |-1/2\rangle$. Широкая часть кривой Ханле моделируется резонансами $|+3/2\rangle \leftrightarrow |-3/2\rangle$ для ядер In и Ga. Положения резонансов по магнитному полю считались подгоночными параметрами. Этот анализ был проведен для всех полученных экспериментальных данных.

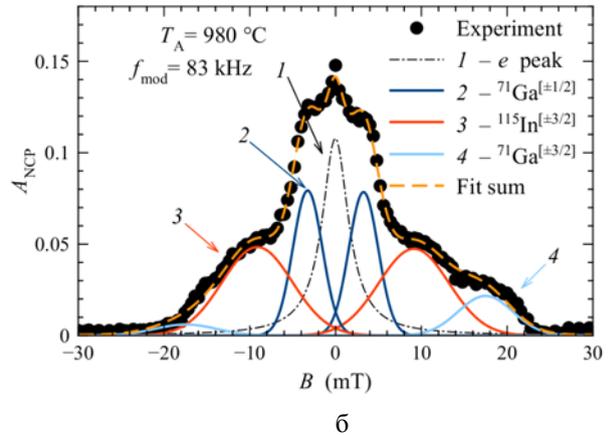
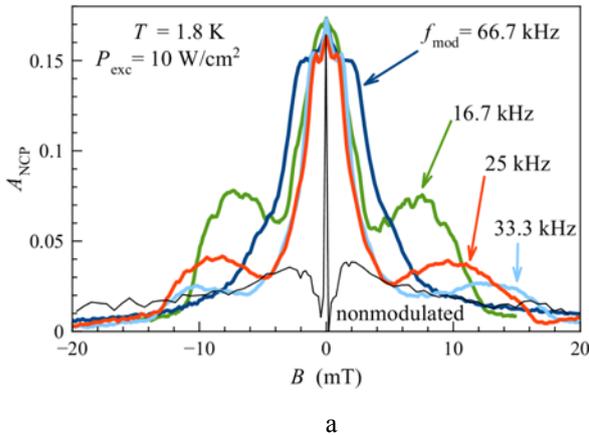


Рис. 2. (а) Кривые Ханле, измеренные при разных частотах модуляции поляризации оптического возбуждения. (б) Разложение кривой Ханле по Гауссианам (символы). Синие Гауссианы – резонансы $|1/2\rangle \leftrightarrow |-1/2\rangle$, красные Гауссианы – резонансы $|+3/2\rangle \leftrightarrow |-3/2\rangle$. Положения резонансов являются подгоночными параметрами. $F_{\text{PM}} = 83$ кГц

Мы обнаружили, что резонанс для ^{71}Ga можно выделить наиболее надежно, и его зависимость от магнитного поля хорошо описывается теоретически в предположении, что квадрупольное расщепление происходит из-за деформации вдоль оси $Z = 0,01$. Это значение хорошо согласуется с оценками в работе [4].

Мы использовали эффект резонансной накачки ядерных спинов в квантовых точках при совместном воздействии быстрой модуляции поляризации оптического возбуждения и синхронном приложении РЧ-поля в поперечном магнитном поле для наблюдения резонансов, связанных с переходами между ядерными спиновыми состояниями, расщепленными полем и квадрупольным взаимодействием. Резонансы наблюдались для большого числа ядерных спиновых переходов у разных видов ядер в квантовых точках.

Список литературы

1. Dzhioev R., Zakharchenya B., Korenev V., Pak P., Vinokurov D., Kovalenkov O., Tarasov I. Fiz. Tverd. Tela (St. Petersburg) 40, 1745 (1998), [Phys. Solid State 40, 1587 (1998)].
2. Ignatiev, Verbin S., Gerlovin I., Cherbunin R., Masumoto Y. Opt. Spektrosk. 106, 427 (2009), [Opt. Spektrosc. 106, 375 (2009)].
3. Paget D., Lampel G., Sapoval B., Safarov V. I. Phys. Rev. B 15, 5780 (Jun 1977).
4. Flisinski K., Gerlovin I. Y., Ignatiev I. V., Petrov M. Y., Verbin S. Y., Yakovlev D. R., Reuter D., Wieck A. D., Bayer M. Phys. Rev. B 82, 081308(R) (Aug 2010).