

NV-центры в алмазе как платформа для полностью оптической квантовой магнитометрии

Д. С. Филимоненко, А. П. Низовцев, С. Я. Килин

*Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь,
e-mail: d.filimonenko@dragon.bas-net.by*

В работе исследованы особенности кросс-релаксации в нулевом магнитном поле в ансамблях NV-центров в алмазе. Продemonстрировано, что амплитуда и ширина линии кросс-релаксационного резонанса в нулевом магнитном поле (ZFCR) зависят от концентрации NV-центров и температуры образца. Изучено поведение данного резонанса в продольных и поперечных магнитных полях. Реализованы способы полностью оптической квантовой магнитометрии без применения СВЧ-излучения. Результаты подтверждают перспективность ZFCR для создания компактных магнитных сенсоров.

Ключевые слова: NV-центры в алмазе, квантовая магнитометрия.

NV Centers in Diamond as a Platform for All-Optical Quantum Magnetometry

D. S. Filimonenko, A. P. Nizovtsev, S. Ya. Kilin

*B. I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus,
e-mail: d.filimonenko@dragon.bas-net.by*

This study investigates the features of zero-field cross-relaxation (ZFCR) in ensembles of NV centers in diamond. It demonstrates that the amplitude and width of the ZFCR line depend on NV center concentration and sample temperature. The behavior of this resonance under longitudinal and transverse magnetic fields has been examined. Methods for all-optical quantum magnetometry without microwave radiation have been implemented. The results confirm the potential of ZFCR for developing compact magnetic sensors.

Keywords: NV centers in diamond, quantum magnetometry.

Введение

Азотно-вакансионные (NV) центры в алмазе рассматриваются как одна из наиболее перспективных систем для применения в квантовых технологиях, включая сенсорику, вычисления и связь. В основе их работы часто лежит метод оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР), требующий, однако, использования СВЧ-излучения, что усложняет и удорожает приборную реализацию. В последнее время [1, 2] были предложены также полностью оптические методы измерения магнитных полей, основанные на регистрации изменений фотолюминесценции в области антипересечения уровней основного состояния (GSLAC). Несмотря на перспективность, эти подходы нуждаются в строгой ориентации кристалла и создании сильных постоянных магнитных полей смещения ($\sim 0,1$ Тл), что ограничивает их практическое применение. Использование явления кросс-релаксации в нулевом поле (ZFCR) позволяет преодолеть указанные ограничения и повысить эффективность полностью оптических магнитометров [3–5]. В данной работе исследуется линия

ZFCR, в частности её зависимость от типа образца, концентрации NV-центров и температуры. Также изучены особенности кросс-релаксации в условиях поперечного магнитного поля и продемонстрирована возможность полностью оптической магнитометрии на основе ансамбля NV-центров с использованием линия ZFCR.

1. Экспериментальная часть

Исследование ZFCR проводилось на установке, схема которой приведена на рис. 1. Луч Nd:YAG-лазера (532 нм, 20 мВт) фокусировался на образце алмаза с помощью объектива. Фотолюминесценция собиралась через оптическое волокно и регистрировалась PIN-фотодиодом, перед которым был установлен блокирующий фильтр для подавления излучения накачки. Локальное магнитное поле создавалось двумя парами катушек Гельмгольца. На одну из катушек подавалось медленно меняющееся напряжение развертки (0,01 Гц) от генератора сигналов через источник питания (PS1). Одновременно накладывалось синусоидальное напряжение более высокой частоты ($\omega = 560$ Гц), вызывающее слабую модуляцию магнитного поля B_1 , воздействующего на образец. Эта модуляция приводила к незначительным изменениям оптического сигнала, которые детектировались фотоприемником и синхронным усилителем.

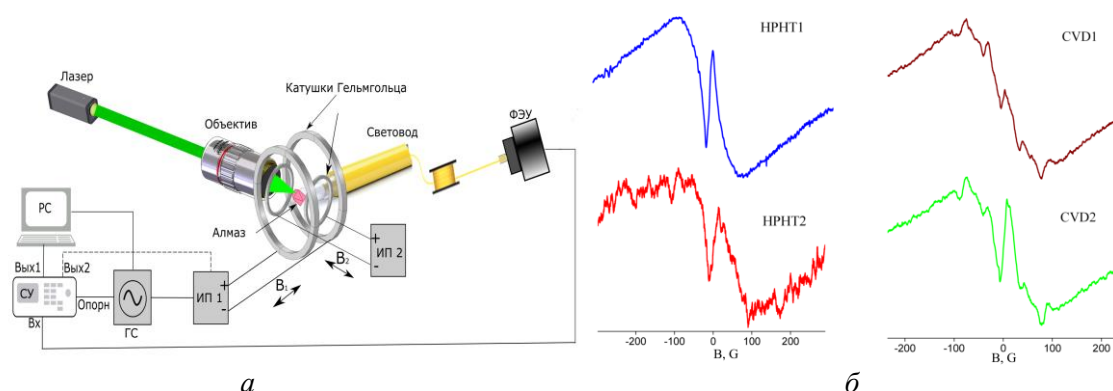


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а); зависимости выходного сигнала синхронного усилителя от напряженности магнитного поля для различных образцов алмаза с NV-центрами (б)

В процессе измерений при плавном изменении поля B_1 регистрировался модуляционный сигнал фотодетектора на частоте ω . Таким образом, выходной сигнал синхронного усилителя был пропорционален производной от интенсивности флуоресценции образца по магнитному полю. Вторая пара катушек Гельмгольца использовалась для генерации дополнительного магнитного поля B_2 . В зависимости от задачи, катушки ориентировались для создания поля, сонаправленного либо ортогонального основному полю B_1 .

В качестве основных образцов использовались монокристаллические алмазы кубооктаэдрической формы (1 мм³, образец HPNT1), синтезированные методом высокого давления и высокой температуры (HPHT), с высокой концентрацией NV-центров (~ 7 ppm). Также изучались образцы поликристаллического алмазного порошка (HPNT2) и монокристаллы, обогащенные изотопом ¹³C (99.9999%), выращенные методом химического осаждения из газовой фазы (CVD1 и CVD2). Концентрация NV-центров в образцах CVD1 и CVD2 составляла 1,5 ppm и 4 ppm соответственно. На рис. 1, б представлены экспериментальные зависимости сигнала

LIA от напряженности магнитного поля для разных образцов. Ширина линии ZFCR для образцов HPHT1 и CVD2 составила около 11 Гс. Для образца CVD1 с наименьшей концентрацией NV-центров наблюдалось существенное уменьшение как амплитуды, так и ширины линии ZFCR (до 6 Гс). Для поликристаллического материала (HPHT2) ширина линии увеличивалась до 15 Гс. Была исследована также зависимость ширины линии ZFCR от температуры. При снижении температуры с +25 до -5 °С ширина линии уменьшилась с 11,1 до 10,4 Гс.

На рис. 2 представлены зависимости, полученные при различных ориентациях и величинах дополнительного магнитного поля, приложенного соосно и ортогонально относительно магнитного поля развертки. Сонаправленная конфигурация полей приводит к сдвигу положения ZFCR, пропорциональному величине дополнительного поля. При взаимно перпендикулярной ориентации наблюдается более сложная трансформация формы резонанса. В слабых полях (<10 Гс) положение дисперсионной кривой не меняется, однако её контур уширяется, а амплитуда незначительно снижается. Дальнейшее увеличение поля приводит к появлению двух дополнительных резонансов, которые по мере роста напряженности поля раздвигаются.

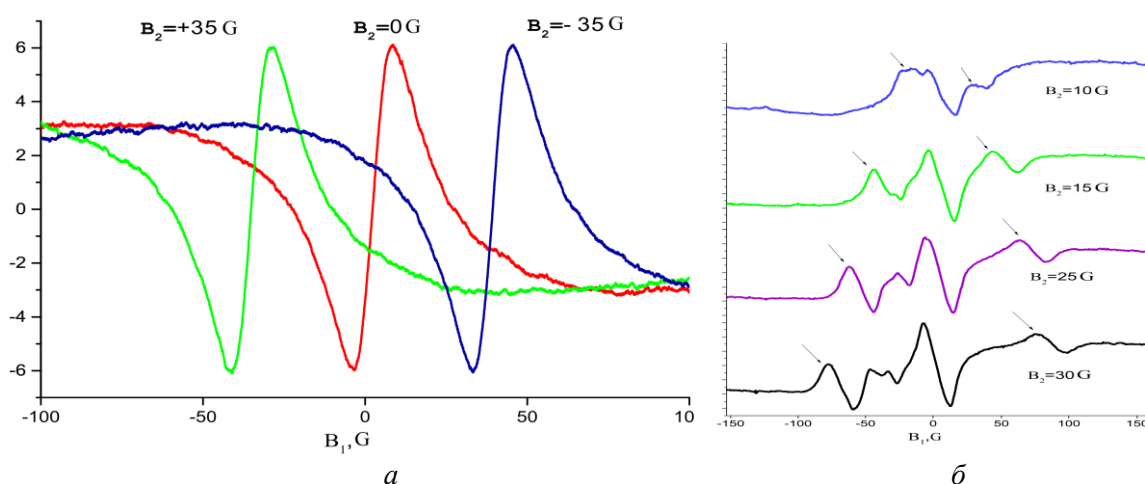


Рис. 2. Зависимости сигнала синхронного усилителя от напряженности магнитного поля при приложении дополнительного магнитного поля: а – сонаправленного; б – перпендикулярного. Стрелками указаны дополнительные резонансы

2. ZFCR-магнитометрия

Наличие линейного участка на дисперсионной кривой, связывающей приложенное магнитное поле с выходным сигналом синхронного усилителя, позволяет использовать этот сигнал для магнитных измерений. В центре кривой сигнал синхронного усилителя равен нулю. Для проведения измерений могут быть использованы следующие подходы:

Измерение слабых магнитных полей.

Развертка магнитного поля отсутствует. Используется только слабая модуляция поля (~0,1 Гс). Когда измеряемое поле отклоняется от нуля, его величина напрямую фиксируется по изменению сигнала синхронного усилителя. На рис. 3, а показан временной отклик магнитометра на калибровочное магнитное поле (0,5 Гс), меняющееся во времени по закону прямоугольного импульса.

Среднеквадратичное отклонение сигнала в течение одного полупериода, усредненное по всему времени измерения, составило 0,04 Гс.

Измерение сильных магнитных полей.

Сигнал с синхронного усилителя подается через усилитель мощности на одну пару катушек. Одновременно на эти же катушки подается переменное напряжение на частоте модуляции (560 Гц). Вторая пара катушек, расположенная соосно с первой, используется для создания измеряемого магнитного поля. В данной конфигурации измеряемое поле компенсируется с помощью пропорциональной отрицательной обратной связи. Выходное напряжение синхронного усилителя (сигнал ошибки) преобразуется в управляющий сигнал для компенсирующего магнитного поля. Поля катушек точно уравнивают друг друга, в результате чего результирующее поле на образце равно нулю. На рис. 3, б показана временная зависимость выходного сигнала синхронного усилителя при плавном изменении измеряемого магнитного поля в диапазоне 0–60 Гс.

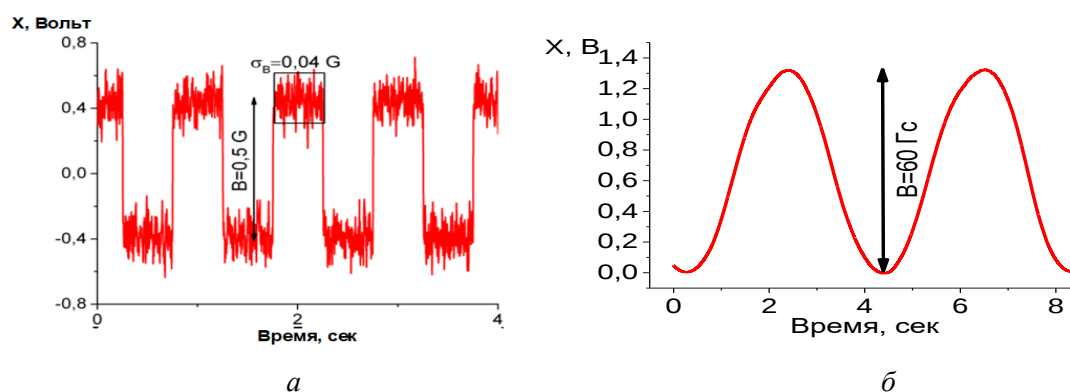


Рис. 3. Временная развертка сигнала магнитометра в режиме измерения:
а – слабых магнитных полей; б – сильных магнитных полей

Заключение

С помощью модуляционной техники получены магнитные спектры ансамблей NV-центров в алмазах, демонстрирующие выраженные резонансы в нулевом поле, амплитуда и ширина которых зависят от концентрации центров. Изучено влияние продольных и поперечных магнитных полей на эти резонансы, показан их потенциал для реализации простейших способов полностью оптической NV-магнитометрии без использования СВЧ-поля. Показана возможность измерения как магнитных полей в широком диапазоне.

Библиографические ссылки

1. Microwave-free magnetometry with nitrogen-vacancy centers in diamond / A. Wickenbrock [et al.]. // App. Phys. Lett. 2016. 109, 053505.
2. Microwave-Free Vector Magnetometry with Nitrogen-Vacancy Centers along a Single Axis in Diamond / H. Zheng [et al.] // Phys. Rev. Appl. 2020. 13. 044023.
3. Weak Magnetic Field Resonance Effects in Diamond with Nitrogen-Vacancy Centers / D. S. Filimonenko [et al.]. // Semiconductors. 2018. 52 (14), P. 1865–1867.
4. Weak magnetic field effects on the photoluminescence of an ensemble of NV centers in diamond: experiment and modelling / D. S. Filimonenko [et al.] // Semiconductors. 2020. 54(12). P. 1730–1733.
Bioenergetic Stability of Organic Matter in Gray Soil (Haplic Luvisol) under Forest and Grassland / D. S. Filimonenko [et al.]. // J. Appl. Spectrosc. 2022. 88(4). P. 1131–1143.