

15

## **Методы диагностики ориентации NV дефектной структуры в алмазе на основе оптического детектирования магнитного резонанса с модуляцией магнитного поля**

© Р.А. Бабунц, М.В. Музафарова, А.Н. Анисимов,  
В.А. Солтамов, П.Г. Баранов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: pavel.baranov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 6 декабря 2014 г.

Предложен метод определения ориентации NV дефектной структуры в алмазе и наноалмазах на основе оптического детектирования магнитного резонанса (ОДМР) с применением модуляции магнитного поля и сканирования частоты СВЧ.

После открытия уникальных излучающих свойств NV-дефектов в алмазе, позволяющих оптически регистрировать магнитный резонанс в основном состоянии NV-дефектов при комнатной температуре вплоть до регистрации магнитного резонанса на единичных дефектах [1,2], появилась возможность абсолютной миниатюризации элементной базы микро- и оптоэлектроники вплоть до устройства на основе единичного дефекта. Отдельный NV-дефект представляет собой вакансию углерода (V), в ближайшей координационной сфере которой один из четырех атомов углерода заменен атомом азота (N).

NV дефектные структуры в алмазе имеют огромный прикладной потенциал в квантовой нанометрологии. Открываются возможности для применения NV-дефектов в таких перспективных областях, как магнитометрия, термометрия, пьезометрия, квантовая оптика, биомедицина, а также для развития новых информационных технологий, основанных на квантовых свойствах спинов и одиночных фотонов. Чтобы достигнуть таких измерений, необходима полная информация об ориентации NV дефектной структуры в алмазной решетке. Определение степени ориентированности NV дефектной структуры в алмазе наряду с необходимостью этой информации для использования этих струк-

тур в качестве сенсоров позволяет диагностировать кристаллические свойства алмазной матрицы, которая может меняться от идеального монокристалла до порошкового микрокристаллического или нанокристаллического композита.

В недавно опубликованной статье подчеркивается важность определения ориентации NV дефектной структуры в алмазе и предложены методы решения поставленной задачи путем приложения внешних электрических и магнитных полей [3]. Также в этой публикации приводится перечень предыдущих работ, где рассмотрены различные способы определения ориентации NV-дефектов в алмазе.

В данной работе предложен метод определения ориентации NV дефектной структуры в алмазе на основе применения метода оптической регистрации магнитного резонанса с использованием модуляции магнитного поля.

Поставленная задача решается тем, что используется модуляция магнитного поля в области исследуемого объекта вместо обычно применяемой модуляции мощности микроволнового поля и одновременного приложения внешнего постоянного магнитного поля. Модуляция векторной величины (магнитного поля) несет в себе информацию об ориентации NV-дефекта, тогда как модуляция мощности СВЧ является модуляцией скалярной величины и для получения информации об ориентации NV-дефекта необходимо приложение дополнительного внешнего магнитного поля.

Важной характеристикой для расшифровки ориентации NV-дефектов в алмазе является информация о динамике изменения расстояния между уровнями с изменением внешнего магнитного поля — уменьшение или увеличение и скорость изменения. Такую информацию дает только модуляция магнитного поля, так как в этом случае регистрируется сигнал в виде производной, знак которой непосредственно определяется направлением: уменьшением или увеличением расстояния между уровнями с магнитным полем, а величина пропорциональна скорости изменения сигнала с магнитным полем. Последнее обстоятельство приводит к значительному увеличению интенсивности сигналов оптически детектированного магнитного резонанса (ОДМР) для узких линий, что в свою очередь увеличивает разрешение сигналов ОДМР по сравнению с методами, с которых модулируется микроволновая мощность.

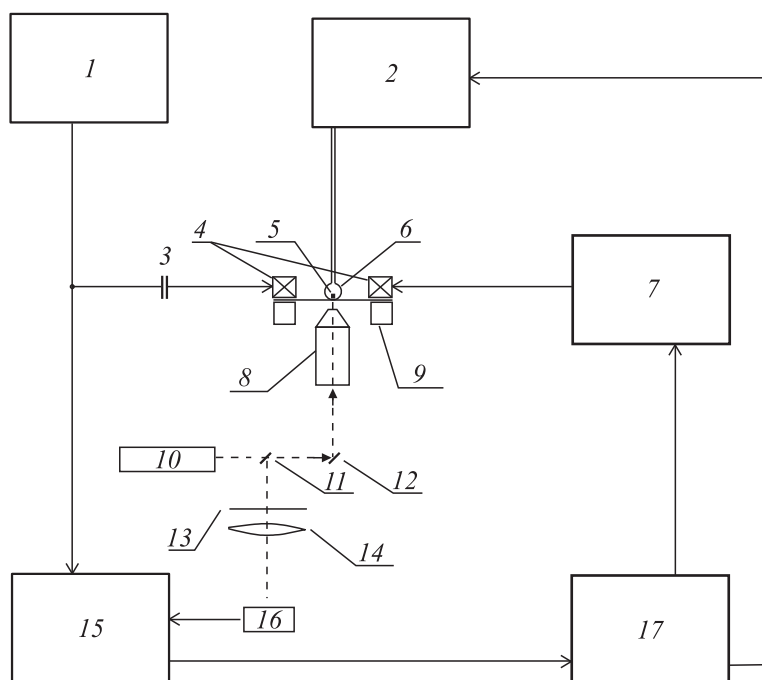
Для определения ориентации NV дефектной структуры в алмазе образец алмаза с NV-дефектами помещается в область поля СВЧ, вы-

бранная область кристалла возбуждается оптически светом (например, с длиной волны 532 nm), при этом возбуждение NV-дефектов алмаза может быть осуществлено с использованием конфокальной оптики. В области исследуемого объекта создается модулированное на низкой частоте магнитное поле. Затем регистрируется изменение люминесценции оптически возбуждаемого объекта в красной спектральной области в момент магнитного резонанса, условия для которого создаются путем развертки частоты СВЧ и величины переменного магнитного поля. Для определения ориентации NV дефектной структуры зарегистрированные спектры ОДМР сравниваются с теоретически рассчитанными положениями линий NV-дефекта в монокристалле алмаза в магнитном поле. Для приближения малых магнитных полей  $B \ll D/g_e\beta_e$  выполняется соотношение

$$h\nu = |D \pm g_e\mu_B B \cos \theta|,$$

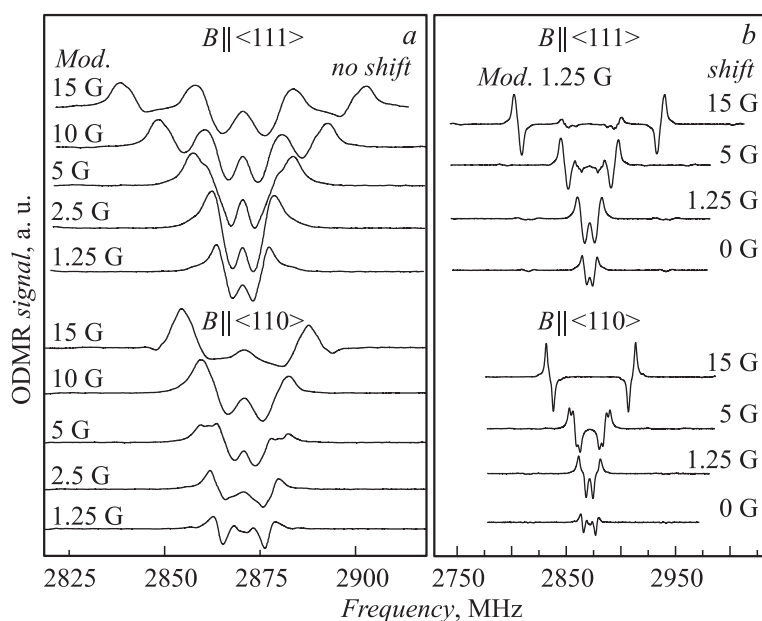
где  $h$  — постоянная Планка,  $\nu$  — частота спектрометра ОДМР,  $g_e = 2.0024$  —  $g$ -фактор для NV-дефекта,  $\mu_B$  — магнетон Бора;  $D = 2870$  MHz — расщепление тонкой структуры для NV-дефекта в алмазе,  $\theta$  — угол между направлением магнитного поля и осью  $\langle 111 \rangle$  кристалла алмаза.

На рис. 1 приведена блок-схема спектрометра ОДМР для осуществления предложенного способа, который работает следующим образом. Микроволновая мощность СВЧ от управляемого генератора СВЧ 2 подается на образец 5 с помощью антенны СВЧ 6. Для создания переменного магнитного поля применяется генератор низкой частоты (НЧ) 1, который подключается к катушке для модуляции магнитного поля 4 через конденсатор 3. Для получения постоянной компоненты магнитного поля — смещения — используется управляемый блок питания 7, подключенный к катушке для модуляции магнитного поля 4. Это дает возможность получения как отдельно переменного или постоянного магнитного поля, так и их сочетания, при этом используется одна и та же катушка, что исключает несовпадение направлений переменного и постоянного магнитных полей. Оптическая накачка осуществляется лазером 10 (например, с длиной волны 532 nm), излучение которого направляется полупрозрачным зеркалом 11 и глухим зеркалом 12 и фокусируется на образец 5 при помощи объектива 8 микроскопа. Люминесценция через тот же объектив и зеркала поступает на светофильтр 13, который отсекает лазерное излучение и затем при помощи



**Рис. 1.** Блок-схема спектрометра ОДМР. Обозначения в тексте.

линзы *14* фокусируется на фотоприемник. Трехкоординатный сканирующий столик с пьезоэлементом *9* позволяет осуществить точную фокусировку на образце, а также сканировать как в плоскости *XU*, так и в плоскостях *XZ* или *YZ* и таким образом прецизионно настраивать прибор при работе с образцами с малой концентрацией дефектов или микрочастицами образца. Сигнал с фотоприемника в виде ФЭУ или лавинного фотодиода *16* подается на синхронный детектор *15*, на который также поступает опорная частота от генератора НЧ *1*. Блок управления *17* задает необходимые переменное и постоянное магнитные поля, разворачивает частоту генератора СВЧ *2* и регистрирует сигнал ОДМР с выхода синхронного детектора *15*. Система оптического возбуждения и регистрации люминесценции может быть частью конфокального микроскопа, если требуется 2D- или 3D-сканирование малого



**Рис. 2.** Спектры ОДМР NV-дефектов, зарегистрированные при комнатной температуре в синтетическом монокристалле алмаза для двух ориентаций магнитного поля относительно осей кристалла:  $B \parallel \langle 111 \rangle$  и  $B \parallel \langle 110 \rangle$ : *a* — для разных величин амплитуды модуляции магнитного поля и при нулевой постоянной компоненте магнитного поля; *b* — для одной величины амплитуды модуляции магнитного поля  $B = 1.25$  G и для разных величин смещения постоянной компоненты магнитного поля, подаваемой на модуляционную катушку.

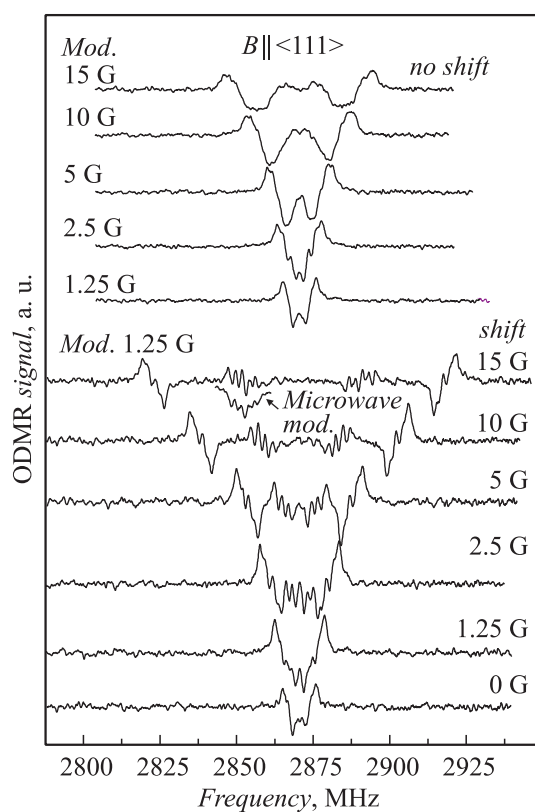
оптически возбуждаемого объема (вплоть до  $0.2 \mu\text{m}$ ). Предполагается также применение микроскопии на основе подавления спонтанного испускания (stimulated emission depletion microscopy — STED), где оптически возбуждаемый и излучаемый объем может быть ограничен вплоть до нескольких нанометров.

На рис. 2, *a* приведены экспериментальные спектры ОДМР NV-дефектов, зарегистрированные при комнатной температуре в синтетическом монокристалле алмаза для двух ориентаций магнитного поля относительно осей кристалла:  $B \parallel \langle 111 \rangle$  (верхняя часть) и  $B \parallel \langle 110 \rangle$

(нижняя часть) для разных величин амплитуды модуляции магнитного поля и при нулевой постоянной компоненте магнитного поля (нулевом смещении). Видно, что спектры существенно отличаются, что обусловлено различием в направлениях NV дефектной структуры относительно направления модуляционного магнитного поля; таким образом, появляется возможность непосредственно разделять эти две ориентации.

Дополнительная важная информация может быть получена с использованием подачи постоянного магнитного поля смещения, при этом выполняются те же условия, что и для модуляционного поля, т.е.  $B \ll D/g_e\beta_e$ . На рис. 2, *b* приведены экспериментальные спектры ОДМР NV-дефектов, зарегистрированные при комнатной температуре в том же синтетическом монокристалле алмаза для двух ориентаций магнитного поля относительно осей кристалла:  $B \parallel \langle 111 \rangle$  (верхняя часть) и  $B \parallel \langle 110 \rangle$  (нижняя часть) для одной величины амплитуды модуляции магнитного поля  $B = 1.25$  G и для разных величин смещения постоянной компоненты магнитного поля, подаваемой на модуляционную катушку. Постоянное смещение магнитного поля подавалось непосредственно на модуляционные катушки одновременно с модуляцией. В этом случае могут быть проведены уточнения ориентации, если это необходимо. Также знак фазы сигнала обеспечивает информацию о направлении изменения расстояния между исследуемыми уровнями, что важно при определении структуры спиновых подуровней. Так на рис. 2 и 3 низкочастотные сигналы соответствуют сходящимся уровням, а высокочастотные сигналы соответствуют расходящимся уровням.

В качестве второго примера исследовался монокристалл природного алмаза. На рис. 3 приведены экспериментальные спектры ОДМР NV-дефектов, зарегистрированные при комнатной температуре в природном монокристалле алмаза для ориентации магнитного поля  $B \parallel \langle 111 \rangle$  (верхняя часть) для разных величин амплитуды модуляции магнитного поля и при нулевом смещении: постоянной компоненте магнитного поля, равной нулю; для одной величины амплитуды модуляции магнитного поля  $B = 1.25$  G и для разных величин смещения постоянной компоненты магнитного поля, подаваемой на модуляционную катушку (нижняя часть); для сравнения показана линия ОДМР, полученная с использованием модуляции мощности. Видно, что разрешение линий сверхтонкой структуры от взаимодействия с азотом лучше при модуляции магнитного поля.



**Рис. 3.** Спектры ОДМР NV-дефектов, зарегистрированные при комнатной температуре в природном монокристалле алмаза для ориентации магнитного поля  $B \parallel \langle 111 \rangle$  (верхняя часть) для разных величин амплитуды модуляции магнитного поля и при нулевом смещении: постоянной компоненты магнитного поля, равной нулю; для одной величины амплитуды модуляции магнитного поля  $B = 1.25$  G (нижняя часть) и для разных величин смещения постоянной компоненты магнитного поля, подаваемой на модуляционную катушку; для сравнения показана линия ОДМР, полученная с использованием модуляции мощности.

Для многих применений используются одиночные NV-дефекты [1,2], при этом необходимо определение ориентации NV-дефекта в кристалле или нанокристалле алмаза. Таким образом, показано, что предложенный

способ может быть эффективно использован для экспресс-анализа ориентации одиночных NV-дефектов.

Недавно были обнаружены вакансионные дефекты в карбиде кремния со свойствами, аналогичными NV-дефектам в алмазе [4]. Предложенный способ может быть использован для определения ориентации этих дефектов в кристалле или нанокристалле карбида кремния.

Работа была поддержана Министерством образования и науки в рамках ФЦП, соглашение № 14.604.21.0083, и РФФИ № 13-12-00821.

## Список литературы

- [1] Gruber A., Drabenstedt A., Tietz C., Fleury L., Wrachtrup J., Von Borzyskowski C. Scanning Confocal Optical Microscopy and Magnetic Resonance on Single Defect Centers // *Science*. 1997. V. 276. P. 2012–2014.
- [2] Wrachtrup J., Jelezko F. // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2006. V. 18. P. S807.
- [3] Doherty M.W., Michl J., Dolde F., Jakobi I., Neumann P., Manson N.B., Wrachtrup J. Measuring the defect structure orientation of a single NV-centre in diamond // *New J. Physics*. 2014. V. 16. P. 063 067 (and references therein).
- [4] Kraus H., Soltanov V.A., Fuchs F., Simin D., Sperlich A., Baranov P.G., Astakhov G.V., Dyakonov V. // *Scientific Reports*. 2014. V. 4. P. 5303.