

15

Оптический квантовый магнитометр с субмикронным разрешением, основанный на явлении антипересечения уровней

© А.Н. Анисимов¹, Д.О. Толмачев¹, Р.А. Бабунц¹,
М.В. Музафарова¹, А.П. Бундакова¹, И.В. Ильин¹,
В.А. Солтамов¹, П.Г. Баранов¹, Е.Н. Мохов^{1,2},
G.V. Astakhov³, V. Dyakonov³

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

² Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

³ Experimental Physics VI, Julius-Maximilian University of Wuerzburg, 97074, Germany

E-mail: pavel.baranov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 8 января 2016 г.

Предложен оптический квантовый магнитометр с субмикронным разрешением, основанный на физическом явлении оптического отклика в твердотельной полупроводниковой спиновой системе в условиях антипересечения спиновых подуровней без использования резонансной частоты. Работа продемонстрирована на спиновых дефектах в карбиде кремния различных политипов.

Обнаружение слабых магнитных полей с высоким пространственным разрешением на уровне микро- и нанометров является важнейшей проблемой в различных областях, начиная от фундаментальной физики и материаловедения до хранения данных и биомедицинской науки. Особую роль в магнитометрии играют оптические квантовые магнитометры.

После открытия уникальных излучающих свойств азотно-вакансионных (NV) центров в алмазе, позволяющих оптически регистрировать магнитный резонанс в основном состоянии NV-центров при комнатной температуре вплоть до регистрации магнитного резонанса на одиночных дефектах [1,2], появилась возможность создания квантовых сенсоров для измерения магнитных полей с микро- и наноразмерным

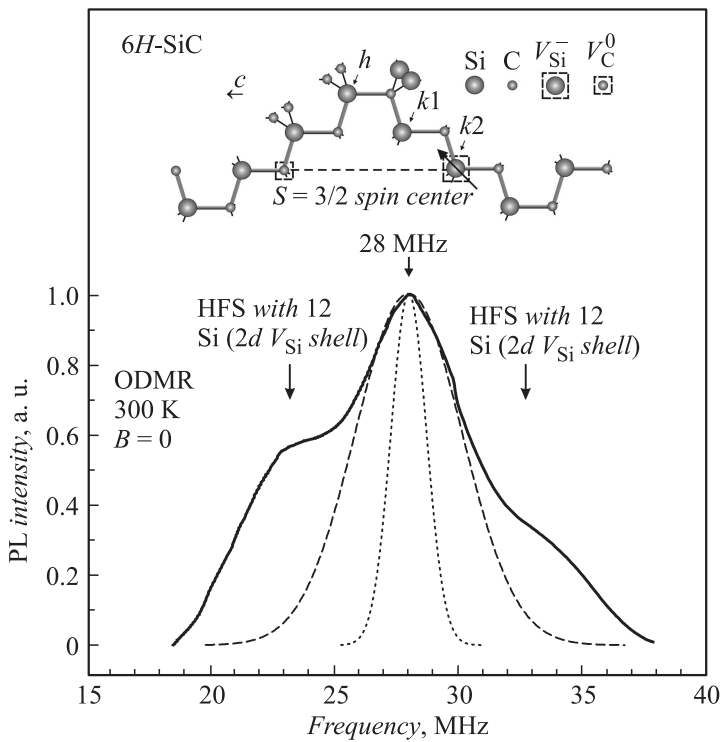


Рис. 1. Спектр ОДМР спиновых центров в 6H-SiC с расщеплением в нулевом магнитном поле, равном 28 МГц, и структурная формула спинового центра (верх). Пунктиром показана линия ОДМР без сателлитов; точками условно показана расчетная линия ОДМР при уменьшении в 10 раз содержания ^{29}Si .

разрешением, при этом принцип магнитометрии основан на оптическом детектировании магнитного резонанса (ОДМР) на NV-центрах в измеряемом внешнем магнитном поле.

Недавно были обнаружены вакансионные центры в карбиде кремния (SiC) со свойствами, аналогичными свойствам NV-центров в алмазе, в дальнейшем будем называть эти центры спиновыми центрами, и предложен способ использования ОДМР для измерения магнитных полей [3–4]. Наличие физического эффекта оптического выстраивания

спинов спиновых центров при облучении кристалла SiC инфракрасным (ИК) светом при комнатной температуре позволяет оптически регистрировать магнитный резонанс в основном состоянии спиновых центров при комнатной температуре вплоть до регистрации магнитного резонанса на одиночных дефектах. Оси ансамбля спиновых центров в SiC ориентированы вдоль гексагональной кристаллографической оси (c -оси), т.е. в отличие от ансамбля NV-центров в алмазе в SiC все центры уже самой природой выстроены вдоль одной оси.

Задачей данной работы является использование эффекта оптического выстраивания спиновых центров в SiC для измерения малых магнитных полей.

На рис. 1 показан спектр ОДМР спиновых центров в политипе 6H-SiC с расщеплением в нулевом магнитном поле, равном 28 МГц. Данные спиновые центры выбраны в качестве примера для демонстрации предложенного магнитометра. Спектр зарегистрирован при комнатной температуре по изменению интенсивности люминесценции в области 850–950 нм, возбуждаемой лазером с длиной волны 785 нм. Вверху представлена структурная формула спинового центра. Ширина линии ОДМР и спутники, показанные стрелками на рис. 1, определяются сверхтонким взаимодействием неспаренных электронов спинового центра с ядрами кремния изотопа ^{29}Si (4.7%, $I = 1/2$), линия ОДМР без спутников представлена условно пунктирной линией. Если предположить, что ширина пунктирной линии определяется только взаимодействием с ^{29}Si , то при уменьшении содержания этого изотопа в 10 раз (такие эксперименты были продемонстрированы в наших предыдущих работах [15,16]) ширина линии может уменьшиться в $(10)^{1/2} \sim 3$ раза (точечная линия на рис. 1). Также следует учитывать взаимодействие с ядрами углерода ^{13}C . Сужение линии должно привести к повышению чувствительности магнитометра.

Спиновый гамильтониан H , описывающий спиновые подуровни для $S = 3/2$ в магнитном поле \mathbf{B} , ориентированном вдоль гексагональной c -оси (z), имеет вид

$$H = g\mu_B \mathbf{S}_z \mathbf{B} + D[\mathbf{S}_z^2 - 1/3S(S+1)],$$

где используются стандартные обозначения.

Энергии спиновых подуровней для проекций спина $M_s = -3/2$, $M_s = +1/2$ и $M_s = -1/2$ соответственно: $E(-3/2) = -3/2g\mu_B B + D$;

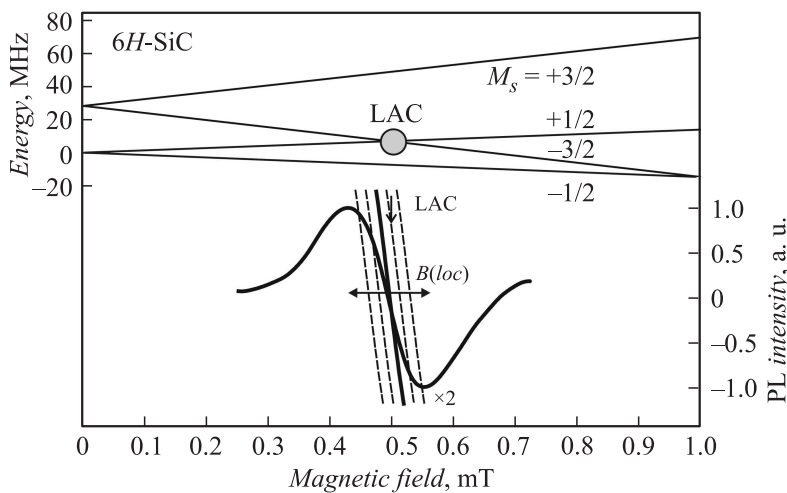


Рис. 2. Энергии спиновых подуровней и первая точка АПУ в магнитном поле $B_I = D/g\mu_B$ (верх). Кружком отмечена точка АПУ (level anticrossing — LAC). Зарегистрированный по изменению интенсивности ФЛ (photoluminescence — PL) сигнал АПУ спиновых центров в 6H-SiC (низ); сигнал зарегистрирован при комнатной температуре для ориентации магнитного поля смещения и модуляционного магнитного поля вдоль c -оси кристалла.

$E(+1/2) = 1/2g\mu_B B - D$ и $E(-1/2) = -1/2g\mu_B B - D$. Магнитные поля для точек антипересечения уровней (АПУ) для уровней $M_S = -3/2, M_S = +1/2$: $B_I = D/g\mu_B$ и для уровней $M_S = -3/2, M_S = -1/2$: $B_{II} = 2D/g\mu_B$.

На рис. 2 (верх) показаны энергии спиновых подуровней и первая точка АПУ в магнитном поле B_I . На рис. 2 (низ) приведен зарегистрированный по интенсивности фотолюминесценции (ФЛ) сигнал АПУ спиновых центров в политипе 6H-SiC с расщеплением в нулевом магнитном поле $2D = 28$ MHz. Сигнал зарегистрирован при комнатной температуре по изменению интенсивности ФЛ в области 850–950 nm, возбуждаемой лазером с длиной волны 785 nm для ориентации постоянного магнитного поля и модуляционного магнитного поля вдоль c -оси кристалла, величина амплитуды модуляции 0.01 mT, частота 80 Hz, постоянное магнитное поле для первой точки АПУ: $B_I = D/g\mu_B = 0.5$ mT.

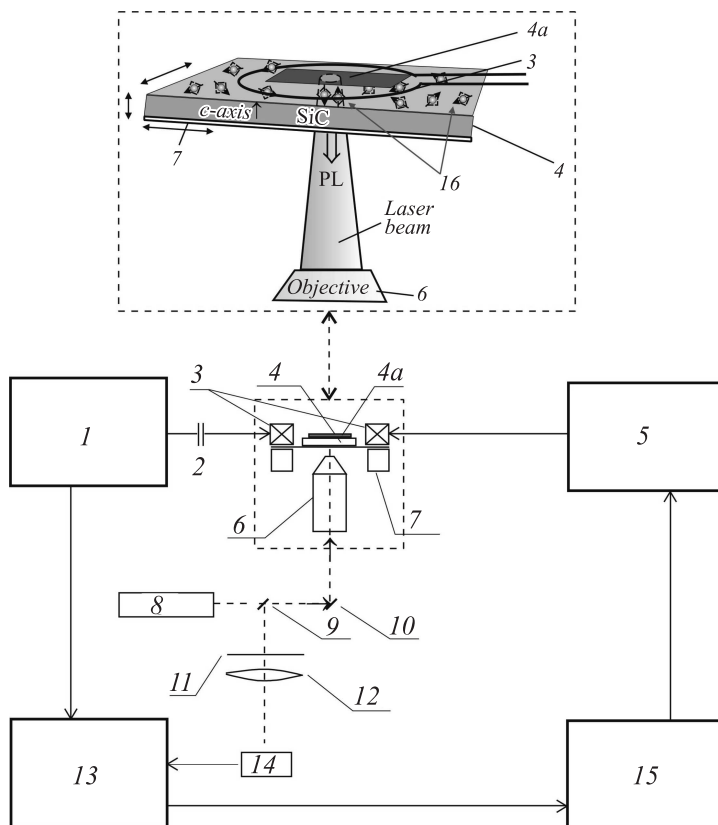


Рис. 3. Блок схема оптического квантового магнитометра. На вставке показан узел оптического микроскопа со сканирующим столиком в виде рабочего кристалла SiC (обозначения в тексте).

Сигнал для первого АПУ значительно уже и меньше зависит от ориентации кристалла, поэтому будем его использовать для измерения магнитных полей.

Предложенный оптический квантовый магнитометр для измерения локального магнитного поля представлен на рис. 3. Магнитометр включает твердотельную электронную спиновую систему, содержащую

множество спиновых центров, которые расположены в пределах кристаллической решетки SiC гексагональных или ромбических политипов и практически свободны от взаимодействия с твердотельной решеткой. Ориентация спиновых центров совпадает с гексагональной осью c кристалла. Монокристалл SiC со спиновыми центрами, вырезанный таким образом, чтобы плоскость кристалла была перпендикулярна гексагональной c -оси кристалла, помещается в постоянное и переменное магнитные поля, создаваемые одной и той же катушкой, что исключает их неаксиальность. Постоянное магнитное поле (поле смещения) соответствует величине, при которой происходит первое антипересечение спиновых подуровней, определяемое соотношением $B_I = D/g\mu_B$: в $6H$ -SiC это поле имеет величину 0.5 мТ; в $4H$ -SiC — 1.25 мТ; в $15R$ -SiC — 0.9 мТ.

С помощью оптической фокусировки возбуждающего луча лазера выделяется рабочий объем образца, с которого снимается ФЛ спиновых центров. Путем подачи постоянного и модуляционного магнитных полей создаются условия АПУ спиновых центров. В этих условиях измеряется изменение ФЛ с помощью синхронного детектора, регистрирующего сигнал АПУ на частоте модуляции в виде производной линии поглощения. Затем производится сравнение полученного магнитного отклика на величину и знак сигнала АПУ с реперным постоянным магнитным полем смещения, обнуляющим величину сигнала АПУ и рассчитанным для заданного спинового центра.

Измеряемое магнитное поле приводит к сигналу магнитного отклика, величина которого зависит от крутизны сигнала АПУ в виде производной, знак определяет отклонение магнитного поля от реперной величины смещения магнитного поля. Оптический квантовый магнитометр (рис. 3) содержит: генератор НЧ 1, конденсатор 2, катушку для модуляции магнитного поля 3, рабочий кристалл 4 (например, $6H$ -SiC со спиновыми центрами), на котором помещен исследуемый образец 4а, управляемый блок питания магнита 5, объектив 6, сканирующий столик с пьезоэлементом 7, лазер 8, полупрозрачное зеркало 9, зеркало 10, светофильтр 11, линзу 12, синхронный детектор 13, фотоприемник в виде ФЭУ или фотодиода 14, блок управления 15. Система оптического возбуждения и регистрации люминесценции может быть частью конфокального микроскопа, если требуется 2D- или 3D-сканирование малого оптически возбуждаемого объема (с радиусом вплоть до $0.2\ \mu\text{m}$). Возможно применение технологии STED (stimulated emission depletion

microscopy), где оптически возбуждаемый и излучаемый объем может быть ограничен вплоть до нескольких нанометров. На вставке рис. 3 показан узел оптического микроскопа, включающий сканирующий столик в виде рабочего кристалла карбида кремния 4, содержащего высокую концентрацию спиновых центров 16, находящихся вблизи поверхности кристалла, который помещен на сканирующий столик 7. С помощью луча лазера, проходящего через объектив 6, выделяется возбуждаемый объем кристалла карбида кремния, близкий к поверхности кристалла и содержащий спиновые центры, условно показанные на рисунке, которые располагаются в тесном контакте с измеряемым образцом 4а, распределение локальных магнитных полей в котором предполагается измерить. Магнитное смещение и модуляционное магнитное поле подаются с помощью катушки 3. Это позволяет модулировать магнитное поле на рабочем кристалле и использовать синхронное детектирование для регистрации магнитного отклика сигнала в виде производной. Прикладывается осциллирующее магнитное поле с низкой частотой модуляции и амплитудой модуляции меньше 0.1 мТ. Сигналы с синхронного детектора как функция магнитного поля в виде первой производной показаны на рис. 2.

Настройка магнитометра с помощью подачи смещения в виде постоянного магнитного поля осуществлялась таким образом, чтобы нулевой сигнал с синхронного детектора был в центре резонанса, обусловленного АПУ. Серия откликов магнитометра, когда дополнительное магнитное поле подается в область локализации спиновых центров в SiC, показана на рис. 2. Поскольку эти сигналы соответствуют свету, который фокусировался в разные точки рабочего кристалла при сканировании, разница сигнала измеряет градиент магнитного поля в поперечной для лазерного пучка плоскости. Возможная величина определения магнитных полей в пятне оптического возбуждения с диаметром приблизительно 0.3 μm порядка 500 нТ при времени измерения сигнала 1 с.

Метод может быть использован для обнаружения высокочастотных переменных магнитных полей, так как при детектировании сигнала магнитного отклика с помощью АПУ снимается временное ограничение обычного ОДМР. Предложен вариант измерения магнитного поля с использованием нанокристалла SiC со спиновыми центрами или одиночного спинового центра. Возможен вариант помещения нанокристалла на зонд АСМ или микроскопа ближнего поля.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки (соглашение № 14.604.20.0083, идентификатор проекта: RFMEFI60414X0083), РФФИ (№ 14-02-91344), РФФ (№ 14-12-00859) за возможность использования высокочастотного ЭПР-ОДМР.

Список литературы

- [1] *Gruber A. et al. // Science. 1997. V. 276. P. 2012–2014.*
- [2] *Wrachtrup J., Jelezko F. // J. Phys.: Condens. Matter. 2006. V. 18. P. S807.*
- [3] *Kraus H. et al. //Scientific Reports. 2014. N 4. P. 5303.*
- [4] *Kraus H. et al. //Nature Physics. 2014. V. 10. P. 157.*
- [5] *Vainer V.S., Il'in V.A. // Sov. Phys. Solid State. 1981. V. 23. P. 2126.*
- [6] *Sörman E. et al. // Phys. Rev. B. 2000. V. 61. P. 2613.*
- [7] *Mizuochi N. et al. // Phys. Rev. B. 2002. V. 66. P. 235 202.*
- [8] *Baranov P.G. et al. // J. Exp. Theor. Phys. Lett. 2007. V. 86. P. 202.*
- [9] *Baranov P.G. et al. // Phys. Rev. B. 2011. V. 83. P. 125 203.*
- [10] *Koehl W.F. et al. // Nature (London). 2011. V. 479. P. 84.*
- [11] *Soltamov V.A. et al. // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. P. 226 402.*
- [12] *Riedel D. et al. // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 109. P. 226 402.*
- [13] *Fuchs F. et al. // Sci. Rep. 2013. V. 3. 1637.*
- [14] *Simin D. et al. // Phys. Rev. Appl. 2015. V. 4. P. 014 009.*
- [15] *Baranov P.G. et al. // Phys. Solid State. 2005. V. 47. P. 2219. [ФТТ. 2005. Т. 47. С. 2127].*
- [16] *Baranov P.G. et al. // J. Appl. Phys. 2007. V. 102. P. 063 713.*