

09;15

## Оптический квантовый термометр с субмикронным разрешением, основанный на явлении антипересечения уровней

© А.Н. Анисимов, Р.А. Бабунц, М.В. Музафарова, А.П. Бундакова, И.В. Ильин, В.А. Солтамов, Н.Г. Романов, П.Г. Баранов<sup>¶</sup>

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

<sup>¶</sup> E-mail: pavel.baranov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 25 октября 2016 г.

Предложен оптический квантовый термометр с субмикронным разрешением, основанный на физическом явлении оптического отклика в системе спиновых центров в карбиде кремния в условиях антипересечения спиновых подуровней возбужденного квадруплетного состояния ( $S = 3/2$ ) с зависимым от температуры расщеплением тонкой структуры.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.07.44471.16539

Измерение слабых температурных 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. Датчик, способный измерять локальную температуру на уровне субкельвина в большом диапазоне температур на расстояниях микро- и нанометров от источника нагрева, найдет широкие приложения в химии и биологии, позволит получить принципиально новую информацию о процессах, приводящих к тепловыделению, например, при обмене энергии в интегральных схемах, в биологических системах, включая диагностику патологических образований.

В работах [1–3] были разработаны оптические квантовые термометры для измерения температур с наноразмерным разрешением на основе NV-центров в алмазе. NV-центр, представляющий собой вакансию углерода (V), в ближайшей координационной сфере которой один из четырех атомов углерода заменен атомом азота (N), име-

ет основное триплетное спиновое состояние, населенности спиновых уровней которого селективно заселяются под действием оптического излучения [4,5], будем называть такие центры „спиновыми центрами“. Принцип термометрии со спиновыми центрами основан на оптическом детектировании магнитного резонанса (ОДМР), поскольку параметры спектров магнитного резонанса зависят от температуры.

Недавно нами были обнаружены вакансионные спиновые центры в карбиде кремния (SiC), в которых населенности спиновых уровней с  $S = 3/2$  селективно заселяются под действием оптического излучения в ближнем ИК-диапазоне, совместимом с полосой прозрачности волоконной оптики и биологических систем, и предложен способ использования ОДМР для измерения магнитных и температурных полей [6–15].

Задачей настоящей работы является разработка такого оптического квантового термометра, который не требовал бы использования ВЧ-излучения, был более простым и дешевым в изготовлении, использовался оптический диапазон, совместимый с волоконной оптикой и полосой прозрачности биологических объектов.

Поставленная задача решается тем, что в качестве активного материала для квантового термометра используется карбид кремния, содержащий спиновые центры, и вместо ОДМР с использованием ВЧ применяется физическое явление антипересечения спиновых уровней в возбужденном состоянии спиновых центров, которое приводит к сильному изменению интенсивности фотолюминесценции в области магнитных полей, близких к точке антипересечения уровней (АПУ) энергии. При этом выбираются такие уровни спинового центра, точка пересечения которых в магнитном поле сильно зависит от температуры, что позволяет использовать этот эффект для определения локальной температуры в объеме карбида кремния, возбуждаемой лазерным излучением.

Спиновый гамильтониан  $H$ , описывающий спиновые уровни спинового центра в магнитном поле  $\mathbf{B}$ , имеет вид

$$H = g_e \mu_B \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} + D(T) [S_z^2 - 1/3 S(S + 1)],$$

где  $g_e = 2.002$  —  $g$ -фактор спинового центра,  $\mu_B$  — магнетон Бора,  $\mathbf{B}$  — постоянное магнитное поле,  $S = 3/2$  — спин спинового центра,  $2D(T)$  — расщепление тонкой структуры. Именно зависимость от температуры параметра  $D(T)$  возбужденного состояния позволила развить

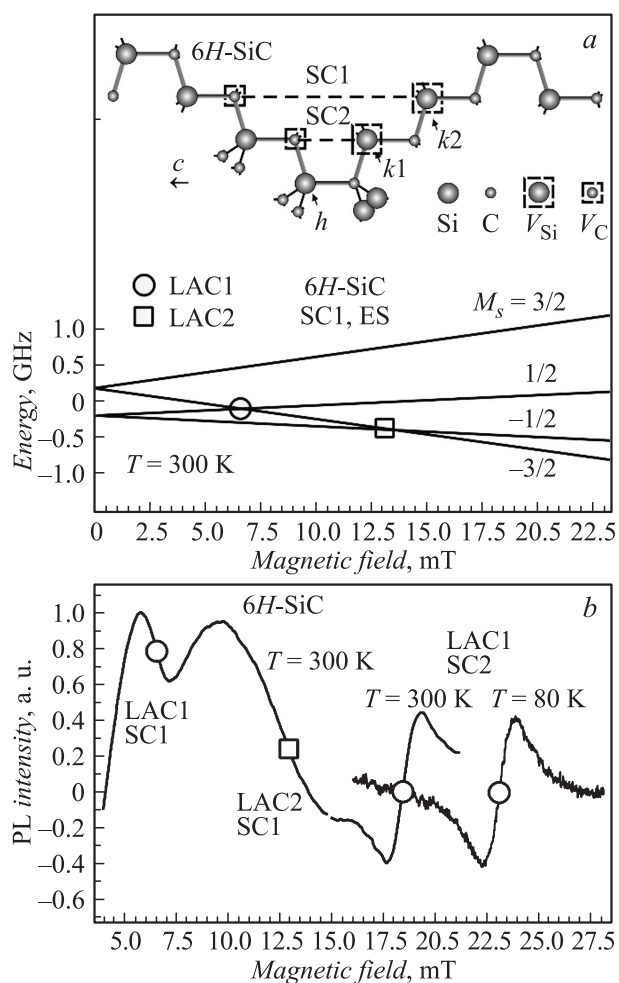
метод измерения температуры в оптически выделенном объеме кристалла. При этом важно подчеркнуть, что расщепление тонкой структуры в основном состоянии практически не зависит от температуры, что может быть использовано для одновременного измерения локальных магнитных полей. Оси ансамбля спиновых центров в SiC ориентированы вдоль гексагональной кристаллографической оси (с-оси), т. е., в отличие от ансамбля NV-центров в алмазе, в карбиде кремния все центры уже самой природой выстроены вдоль одной оси.

В качестве примера рассмотрим политип 6H-SiC, однако подобные результаты были получены нами и для политипов 4H-SiC и 15R-SiC. На рис. 1, *a* показана структурная формула двух спиновых центров (spin center — SC) с основным и возбужденным спиновыми состояниями  $S = 3/2$  ( $V_{Si}$  — отрицательно заряженная вакансия кремния;  $V_C$  — нейтральная вакансия углерода) для карбида кремния политипа 6H-SiC. Ниже на этом же рисунке приведена схема энергетических спиновых уровней в магнитном поле для возбужденного состояния спинового центра SC1 в 6H-SiC. На схеме энергетических уровней точки антипересечения уровней (level anticrossing — LAC) показаны кружком для спиновых уровней с проекциями спинов ( $M_S$ )  $M_S = -3/2$ ,  $M_S = 1/2$  (LAC1) и квадратом для LAC с  $M_S = -3/2$ ,  $M_S = -1/2$  (LAC2).

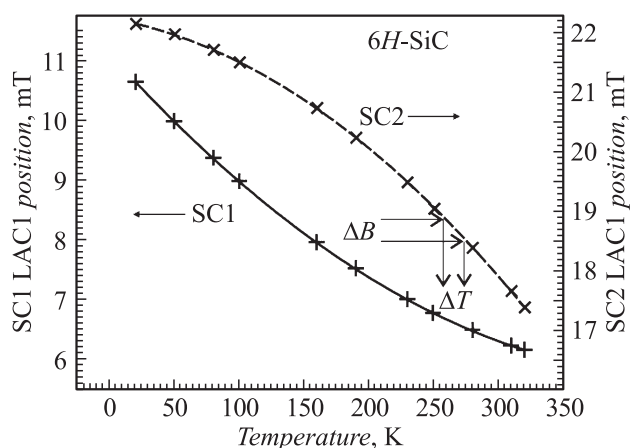
На рис. 1, *b* приведены изменения интенсивности фотолюминесценции (PL) спиновых центров в зависимости от приложенного магнитного поля при температуре 300 К. Зависимости зарегистрированы в области антипересечения уровней для возбужденных состояний SC1 и SC2 в кристалле 6H-SiC. Точки антипересечения для LAC1 и LAC2 обозначены кружком и квадратом соответственно. Для SC2 показаны только зависимости в области LAC1 для двух температур 300 и 80 К.

На рис. 2 приведены градуировочные графики в виде зависимости положения LAC1 для SC1 и SC2 от температуры в кристалле 6H-SiC. На рисунке указано изменение магнитного поля ( $\Delta B$ ) LAC1 в двух точках активного материала, находящихся при разных температурах (разность температур создается, например, нагревателем, расположенным на разных расстояниях от заданных точек). Разность температур ( $\Delta T$ ) в заданных точках определяется с помощью градуировочной кривой.

Измерение температуры происходит следующим образом. В области изменения интенсивности люминесценции снимают кривые зависимости изменения интенсивности люминесценции кристалла SiC от величины постоянного магнитного поля при разных температурах и



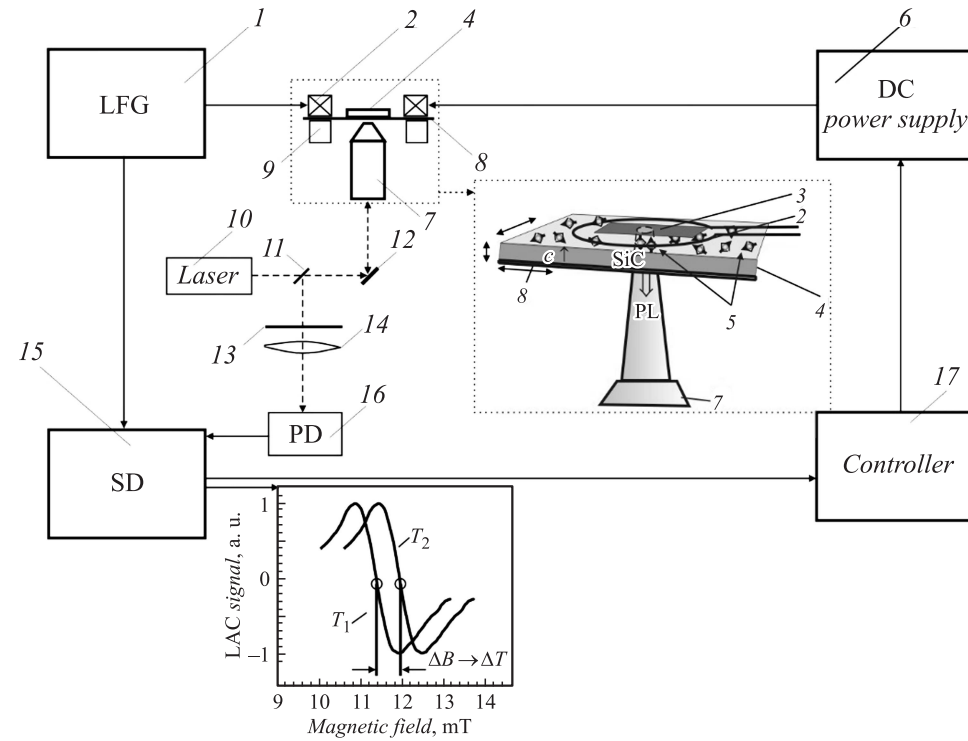
**Рис. 1.** *a* — структурная формула двух спиновых центров SC1 и SC2 и схема энергетических спиновых уровней в магнитном поле для возбужденного квадруплетного состояния спинового центра SC1 в 6H-SiC. *b* — изменения интенсивности фотолуминесценции (PL) спиновых центров в зависимости от приложенного магнитного поля в области антипересечения уровней.



**Рис. 2.** Градуировочные графики в виде зависимости положения LAC1 для SC1 и SC2 от температуры в кристалле 6H-SiC.

строят градуировочную кривую для положения LAC1 в магнитном поле от температуры. Затем помещают на поверхность кристалла SiC исследуемый образец и измеряют магнитное поле в точке LAC1. Используя известную градуировочную кривую, определяют температуру в области возбуждения люминесценции. Проводя сканирование поверхности образца, можно построить карту распределения температур по образцу.

Блок-схема оптического квантового термометра представлена на рис. 3. Для создания и развертки магнитного поля используется источник постоянного тока 6 (DC power supply). Для формирования частоты модуляции используется генератор низких частот (low frequency generator LFG) 1 и катушка 2 электромагнита. Созданное магнитное поле проникает в кристалл карбида кремния 4 и исследуемый образец 3. Спиновые центры 5 реагируют на тепловой контакт с образцом 3, и мы можем регистрировать изменение люминесценции возбужденных спиновых центров с помощью объектива 7. Возбуждение осуществляется с помощью лазера (laser) 10 с длиной волны 808 nm. Сбор сигнала люминесценции происходит через полупрозрачное зеркало 11, зеркало 12, светофильтр 13 и линзу 14. Детектирование люминесценции осуществляется с помощью фотоприемника (PD) 16



**Рис. 3.** Блок-схема оптического квантового термометра, описание в тексте. На вставке схематически показан узел оптического микроскопа в аксонометрии. Внизу показаны изменения интенсивности фотолюминесценции в области LAC1 в зависимости от величины постоянного магнитного поля для двух температур ( $T_1$  и  $T_2$ );  $\Delta B$  — расстояние между двумя положениями LAC1 в магнитном поле,  $\Delta T$  — сдвиг по температурам между двумя измерениями.

с диапазоном чувствительности 800–1100 nm. Далее сигнал поступает с детектора на синхронный детектор (SD) 15 и далее на блок управления и регистрации спектров (controller) 17. Для получения пространственного разрешения используется сканирующий столик 8 с пьезоэлементом 9. На вставке показан узел оптического микроскопа со сканирующим столиком, на котором помещен активный материал в виде кристалла карбида кремния со спиновыми центрами, показанный схематически в аксонометрии, фотолюминесценция, возбуждаемая лазером через объектив микроскопа. Внизу показаны изменения интенсивности фотолюминесценции в области LAC1 спиновых центров в возбужденном квадруплетном состоянии кристалла карбида кремния в зависимости от величины постоянного магнитного поля для двух температур ( $T_1$  и  $T_2$ ). Точность измерения температуры с использованием сигнала LAC1, зарегистрированного с помощью синхронного детектирования при малой низкочастотной модуляции магнитного поля в виде производной, может достигать 50 мК за время регистрации 1 с с пространственным разрешением  $\sim 200$  nm, соответствующим размеру пятна сфокусированного лазера конфокального микроскопа.

Таким образом, предложен квантовый термометр с субмикронным разрешением на карбиде кремния, основанный на зависимости расщепления тонкой структуры спиновых центров от температуры.

Авторы благодарят за поддержку Министерство образования и науки, соглашение № 14.604.21.0083, идентификатор проекта: RFMEFI60414X0083.

## Список литературы

- [1] *Acosta V.M.* et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2010. V. 104. P. 070801.
- [2] *Neumann P.* et al. // *Nano Lett.* 2013. V. 13. P. 2738–2742.
- [3] Patent. Publication number WO 2014165505 A1. Application number PCT/US2014/032511. Published Oct 9, 2014.
- [4] *Gruber A.* et al. // *Science.* 1997. V. 276. P. 2012–2014.
- [5] *Wrachtrup J., Jelezko F.* // *J. Phys.: Condens. Matter.* 2006. V. 18. P. S807.
- [6] *Kraus H.* et al. // *Scientific Reports.* 2014. V. 4. P. 5303.
- [7] *Kraus H.* et al. // *Nature Phys.* 2014. V. 10. P. 157.
- [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. 125203.
- [10] *Soltamov V.A.* et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2012. V. 108. P. 226402.

- [11] *Riedel D.* et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2012. V. 109. P. 226402.
- [12] *Simin D.* et al. // *Phys. Rev. Appl.* 2015. V. 4. P. 014009.
- [13] *Soltamov V.A.* et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2015. V. 115. P. 247602.
- [14] *Astakhov G.V.* et al. // *Appl. Magn. Reson.* 2016. V. 47. P. 793–812.
- [15] *Simin D., Soltamov V.A., Poshakinskiy A.V.* et al. // *Phys. Rev. X.* 2016. V. 6. P. 031014 (1–12).