

## РАЗРАБОТКА СЕНСОРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ НАНОЧАСТИЦ SiC ГЕКСАГОНАЛЬНОГО ПОЛИТИПА, СОВМЕЩЕННЫХ С АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИЕЙ

Учаев М.В. (ИМТО), Лихачев К.В. (ФТИ им. Иоффе)

Научный руководитель – кандидат физ.-мат. наук, Invited Professor Дунаевский М.С. (ИТМО)

**Введение.** Спиновые дефекты в полупроводниках широко используются для зондирования магнитных полей на наноуровне. Наиболее ярким примером является азотно-вакансионный центр в алмазе, который уже коммерчески используется для различных приложений, включая визуализацию магнитных доменов [1] и визуализацию электрических токов [2]. Принцип зондирования основан на спектроскопии магнитного резонанса с оптическим детектированием и предполагает применение резонансных СВЧ-полей с одновременным измерением интенсивности флуоресценции. Алмазные зонды обычно изготавливаются вручную и устанавливаются на кантилеверы обычных атомно-силовых микроскопов из других материалов. Совсем недавно в карбиде кремния были обнаружены внутренние дефекты, которые стали серьезными кандидатами для сенсорных приложений, выходящих за рамки алмаза. В SiC расположены спиновые центры, в частности вакансии [3] и дивакансии [4] кремния, которые могут когерентно управляться при комнатной температуре [5, 6], обладают большим временем когерентности в диапазоне мс [7, 8], обнаруживают однофотонное излучение [7, 9, 10] со спектрально узкой нуль-фононной линией [11, 12] и демонстрируют интегрируемость в электронные и фотонные схемы [13]. Кроме того, эти спиновые центры в SiC позволяют проводить полностью оптическую магнитометрию без использования микроволнового излучения (эффект антипересечения уровней) [14]. В частности, подход без использования микроволн позволяет проводить измерения в электропроводящих средах, таких как интегральные микросхемы или биологические растворы, и избегать ложного возбуждения или нагрева под действием микроволнового излучения. Несмотря на очевидные преимущества, сканирующая магнитометрия без микроволн на основе SiC до сих пор не реализована.

**Основная часть.** Мы предлагаем использовать систему управления и считывания квантового состояния V-центров в карбиде кремния, которая использует в качестве управляющего элемента магнитное поле в диапазоне до 20 мТл, и полностью исключаем необходимость приложения радиочастотного поля. Для этого мы используем развертку магнитного поля и резонансные сигналы в спектрах оптически детектируемого магнитного резонанса (ОДМР) без приложения радиочастотного поля, которые соответствуют процессам антипересечения спиновых подуровней в основном состоянии V-центра для магнитометрии и в возбужденном состоянии V-центра для термометрии.

Область спектра фотолюминесценции V-центров лежит в ближнем инфракрасном диапазоне, что попадает в окно прозрачности биологических систем. Ориентация всех V-центров одинаковая, что исключает наложение разных резонансных линий в спектрах ОДМР друг на друга. Расщепление в нулевом поле 27 и 128 МГц, соответствует величине магнитных полей 0.9 и 4.4 мТл, необходимых для магнитного резонанса в точке антипересечения уровней, что можно обеспечить меньшими магнитами с меньшим потреблением энергии и отсутствием

необходимости охлаждения. В дополнение спиновая система V-центров с  $S=3/2$  состоит из большего числа уровней, что увеличивает набор резонансных сигналов и разрешает усреднение по нескольким линиям.

**Выводы.** Ранее V-центры в карбиде кремния не исследовались на предмет совместимости с АСМ-кантилевером, хотя использование NV-центров в алмазе в такой конфигурации уже осуществлялось. Совмещение с АСМ-кантилевером предлагает множество дополнительных преимуществ для этой технологии. Это будет нововведением данного проекта.

#### **Список использованных источников:**

1. Sun Q. C. et al. Magnetic domains and domain wall pinning in atomically thin CrBr<sub>3</sub> revealed by nanoscale imaging //Nature communications. – 2021. – Т. 12. – №. 1. – С. 1989.
2. Nowodzinski A. et al. Nitrogen-vacancy centers in diamond for current imaging at the redistributive layer level of integrated circuits //Microelectronics Reliability. – 2015. – Т. 55. – №. 9-10. – С. 1549-1553.
3. Kraus H. et al. Room-temperature quantum microwave emitters based on spin defects in silicon carbide //Nature Physics. – 2014. – Т. 10. – №. 2. – С. 157-162.
4. Falk A. L. et al. Polytype control of spin qubits in silicon carbide Nat //Commun. – 2013. – Т. 4. – С. 1819.
5. Koehl W. F. et al. Designing defect spins for wafer-scale quantum technologies //MRS Bulletin. – 2015. – Т. 40. – №. 12. – С. 1146-1153.
6. Soltamov V. A. et al. Excitation and coherent control of spin qubit modes in silicon carbide at room temperature //Nature communications. – 2019. – Т. 10. – №. 1. – С. 1678.
7. Christle D. J. et al. Isolated electron spins in silicon carbide with millisecond coherence times //Nature materials. – 2015. – Т. 14. – №. 2. – С. 160-163.
8. Simin D. et al. Locking of electron spin coherence above 20 ms in natural silicon carbide //Physical Review B. – 2017. – Т. 95. – №. 16. – С. 161201.
9. Widmann M. et al. Coherent control of single spins in silicon carbide at room temperature //Nature materials. – 2015. – Т. 14. – №. 2. – С. 164-168.
10. Fuchs F. et al. Engineering near-infrared single-photon emitters with optically active spins in ultrapure silicon carbide //Nature communications. – 2015. – Т. 6. – №. 1. – С. 7578.
11. Christle D. J. et al. Isolated spin qubits in SiC with a high-fidelity infrared spin-to-photon interface //Physical Review X. – 2017. – Т. 7. – №. 2. – С. 021046.
12. Morioka N. et al. Spin-controlled generation of indistinguishable and distinguishable photons from silicon vacancy centres in silicon carbide //Nature communications. – 2020. – Т. 11. – №. 1. – С. 2516.
13. Fuchs F., Soltamov V. A. S. V% th, PG Baranov, EN Mokhov, GV Astakhov and V. Dyakonov //Sci. Rep. – 2013. – Т. 3. – С. 1637-1640.
14. Simin D. et al. All-optical dc nanotesla magnetometry using silicon vacancy fine structure in isotopically purified silicon carbide //Physical Review X. – 2016. – Т. 6. – №. 3. – С. 031014.