

## 双螺线圈射频共振结构增强硅空位自旋传感灵敏度方法

张文杰 刘郁松 郭浩 韩星程 蔡安江 李圣昆 赵鹏飞 刘俊

## Methodology of improving sensitivity of silicon vacancy spin-based sensors based on double spiral coil RF resonance structure

Zhang Wen-Jie Liu Yu-Song Guo Hao Han Xing-Cheng Cai An-Jiang Li Sheng-Kun Zhao Peng-Fei Liu Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 234206 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200765

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200765>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

高灵敏度的量子迈克耳孙干涉仪

High sensitivity quantum Michelson interferometer

物理学报. 2018, 67(13): 134202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172563>

抽样法与灵敏度法 $k_{eff}$ 不确定度量化

Uncertainty quantification in the calculation of  $k_{eff}$  using sensitivity and stochastic sampling method

物理学报. 2017, 66(1): 012801 <https://doi.org/10.7498/aps.66.012801>

利用金刚石氮-空位色心精确测量弱磁场的探索

Measurement of weak static magnetic field with nitrogen-vacancy color center

物理学报. 2017, 66(23): 230601 <https://doi.org/10.7498/aps.66.230601>

基于金刚石体系中氮-空位色心的固态量子传感

Solid quantum sensor based on nitrogen-vacancy center in diamond

物理学报. 2018, 67(16): 160301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180788>

AlGaIn/GaN高电子迁移率晶体管温度传感器特性

Characteristics of AlGaIn/GaN high electron mobility transistor temperature sensor

物理学报. 2020, 69(4): 047201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20190640>

氧化对单颗粒层纳米金刚石薄膜硅空位发光和微结构的影响

Effects of oxidation on silicon vacancy photoluminescence and microstructure of separated domain formed nanodiamond films

物理学报. 2019, 68(16): 168101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190422>

# 双螺线圈射频共振结构增强硅空位自旋传感灵敏度方法\*

张文杰<sup>1)</sup> 刘郁松<sup>1)</sup> 郭浩<sup>1)†</sup> 韩星程<sup>1)</sup> 蔡安江<sup>2)3)</sup>  
李圣昆<sup>1)</sup> 赵鹏飞<sup>1)</sup> 刘俊<sup>1)</sup>

1) (中北大学, 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

2) (西安建筑科技大学机电工程学院, 西安 710311)

3) (陕西省纳米材料与技术重点实验室, 西安 710311)

(2020年5月20日收到; 2020年6月26日收到修改稿)

针对硅空位自旋磁共振信号射频场非均匀展宽问题, 提出并设计了一种双螺线圈射频共振结构, 利用双螺线圈平行对称特性, 构建射频场均匀区, 非均匀性小于0.9%, 相比单根直线性结构, 均匀性提高了56.889倍. 同时, 利用射频信号近距离互感耦合共振特性, 实现了射频场的增强, 相比单线圈结构增强了1.587倍, 等效的自旋传感灵敏度提高了4.833倍. 实验中搭建基于SiC硅色心自旋磁共振效应的光探测磁共振传感测量系统, 通过对比不同类型的射频天线, 测试得到基于双螺线圈射频共振天线结构的硅空位色心自旋磁共振信号对比度提高了6倍, 通过调制解调信息解算方法得到传感器的灵敏度提高了4.833倍, 传感器噪声降低了8倍, 提高了硅空位自旋传感测量灵敏度, 结合SiC晶圆芯片制造技术, 为高精度、芯片级自旋量子传感器件的制造提供了技术支撑.

**关键词:** 硅空位色心, 射频共振天线, 均匀场, 自旋传感, 灵敏度

**PACS:** 42.60.Da, 42.60.By, 42.87.-d, 42.50.-p

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200765

## 1 引言

近年来, 碳化硅硅空位色心自旋量子功能结构, 由于其室温下自旋相干时间长、光学泵浦与探测方法简单, 且兼容碳化硅晶圆加工工艺成熟、易于光电器件集成等特性<sup>[1-5]</sup>, 在量子传感与精密测量、量子计算、量子通信等领域展现出了极为广阔的应用前景<sup>[6-12]</sup>.

目前, 基于碳化硅硅空位色心自旋量子特性的传感与测量技术在单光子源、分子扭矩测量、细胞温度环境监测、磁强计等领域得到了广泛应用<sup>[13-18]</sup>, 且测量精度不断突破传统测量技术精度极限, 成为未来固体量子传感与测量技术发展的主要方向之一<sup>[19,20]</sup>, 然而受限于射频/微波、激光等功率非均匀展宽与波动噪声影响, 导致自旋退相干时间短, 测量精度难以达到理论测量极限<sup>[21,22]</sup>.

目前常用的射频天线结构主要采用单根直

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFB0503100)、博士后创新人才支持计划 (批准号: BX20180276)、国家自然科学基金 (批准号: 51805493, 51922009, 51727808, 51775522)、中国博士后科学基金 (批准号: 2018M641684)、山西省应用基础研究项目 (批准号: 201801D221202, 201901D111011(ZD), 201801D121164)、山西省重点研发计划 (批准号: 201803D121067)、重点实验室基金 (批准号: 6142001180410, 6142001180409)、山西省重点实验室 (批准号: 201905D121001)、中北大学青年学术带头人 (批准号: QX201901) 和山西省 1331 工程重点学科建设计划 (1331Project) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: guohao@nuc.edu.cn

导线结构, 该结构的射频场以直导线为中心向外辐射, 无法构建射频场均匀区<sup>[23]</sup>. 而应用于微波领域的微波腔均匀天线结构, 由于射频信号波长长, 导致均匀天线结构尺寸达到  $100 \text{ cm}^2$ , 限制了 SiC 自旋功能结构的应用领域<sup>[24]</sup>.

本文针对 SiC 基自旋传感测量技术对射频均匀场的需求, 提出设计了一种基于双螺旋线圈平行对称结构的射频共振增强天线结构 (简称双螺旋线圈共振天线 double helical coil resonant antenna, DHCRA). 通过仿真模拟计算, 设计的螺旋线圈结构的中心频率为 70 MHz, 辐射强度为 73 A/m, 通过构建双螺旋线圈平行对称结构, 天线的辐射强度增大了 1.587 倍, 且均匀区达到  $\pi \times 375 \text{ mm}^2 \times 10 \text{ mm}$ , 相比单根直导线结构均匀性提高了 56.889 倍. 最后通过应用到 SiC 硅空位色心自旋测量系统中, 得到该结构使得传感测量灵敏度提升了 4.833 倍, 为高灵敏度自旋传感测量技术提供了技术支撑.

## 2 天线设计与制造

本文基于对称偶极子天线理论与单螺旋天线理论, 设计了双螺旋线圈平行对称共振射频天线结构, 基于理论公式分析计算<sup>[25–29]</sup>, 通过电磁仿真软件 HFSS 进行优化, 最后得到如图 1(a) 所示的三维结构, 通过优化线圈的结构尺寸参数得到最优的结构参数如图 1(b) 所示.

通过软件进行磁场仿真, 可以得到在  $X$ - $Z$  截

面模拟的磁场  $B$  示意图, 如图 2(a) 所示. 可以看出磁场  $B$  主要集中在沿着  $Z$  轴方向两侧均匀区, 因此, 可以将碳化硅色心结构放置在双螺旋线圈两侧的均匀区, 有效降低自旋磁共振效应的非均匀展宽问题. 在图 1(b) 的实验参数基础上, DHCRA 天线的  $S_{11}$  参数即回波损耗的电磁仿真结果与实验测试结果如图 2(b) 所示. 经过 HFSS 参数化扫描结果分析, 得到最优的回波损耗信号, 本文设计的天线结构在 70 MHz 的回波损耗最优可以达到  $-33 \text{ dB}$ . 由于 DHCRA 的辐射功率与阻抗有关系, 因此, 在 DHCRA 之间接入  $50 \Omega$  匹配阻抗来提高射频信号的辐射效率.

通过测试得到谐振频率实际测试结果与仿真结果相差约 5 MHz, 主要原因包括: 1) 受限于加工工艺精度, 射频天线的金属线条的直径、线圈长度、线条间隔、线圈整体直径难以完全与仿真尺寸一致; 2) 基材材质的介电常数、电阻率等参数采用理想模型, 与实际有差异; 3) 当两个线圈之间的间隔在  $0.4$ — $15.0 \text{ mm}$  之间时谐振峰位置基本不变, 只影响回波损耗值, 当间距小于  $0.4 \text{ mm}$ , 谐振频率与线圈间距成反比; 4) 测试环境的温湿度引起的线条热胀冷缩 (通常情况下较小, 可以忽略); 5) 测试时测量尾线的长度和弯曲形变 (可改变尾线的长度和形变来控制螺旋线圈的谐振频率).

图 3(a) 与图 3(b) 为输入 70 MHz 信号时, DHCRA 结构的两个截面的场强  $B$  分布结构图. 从图中可以看到, DHCRA 沿着  $Z$  轴的场强  $B$  分布均匀,

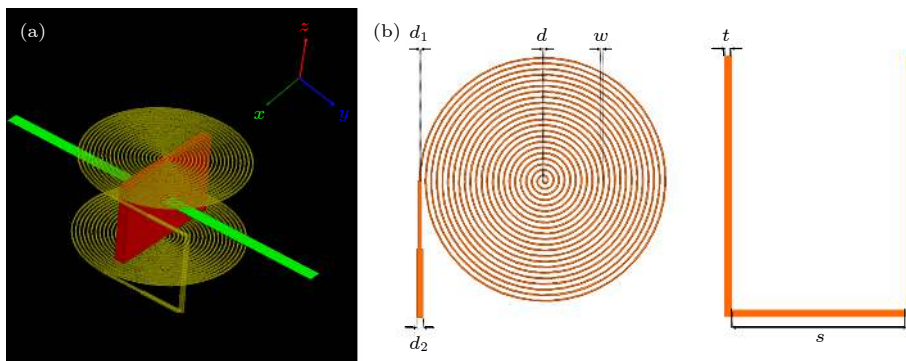


图 1 (a) DHCRA 结构示意图, 红色部分为碳化硅样品, 黄色部分为天线, 绿色部分为碳化硅硅空位色心激发用的红光 730 nm 激光器, 色心发出的光为红外 890—1000 nm; (b) DHCRA 设计参数: 天线铜线线宽  $d = 0.4 \text{ mm}$ , 天线铜线线间距  $w = 0.73 \text{ mm}$ , 天线铜线厚度  $t = 0.035 \text{ mm}$ , 双天线之间的距离  $s = 10 \text{ mm}$ , 输入接口线宽  $d_1 = 0.67 \text{ mm}$ ,  $d_2 = 1.2 \text{ mm}$

Fig. 1. (a) Schematic diagram of double helical coil resonant antenna, the red part is the silicon carbide sample, the yellow part is the antenna, the green part is the red light 730 nm laser used for the excitation of the vacancy color center of silicon carbide silicon, the light emitted by the color center is infrared 890–1000 nm; (b) spiral antenna design parameters: antenna copper wire width  $d = 0.4 \text{ mm}$ , antenna copper wire spacing  $w = 0.73 \text{ mm}$ , antenna copper wire thickness  $t = 0.035 \text{ mm}$ , distance between dual antennas  $s = 10 \text{ mm}$ , input interface line width  $d_1 = 0.67 \text{ mm}$ ,  $d_2 = 1.2 \text{ mm}$ .

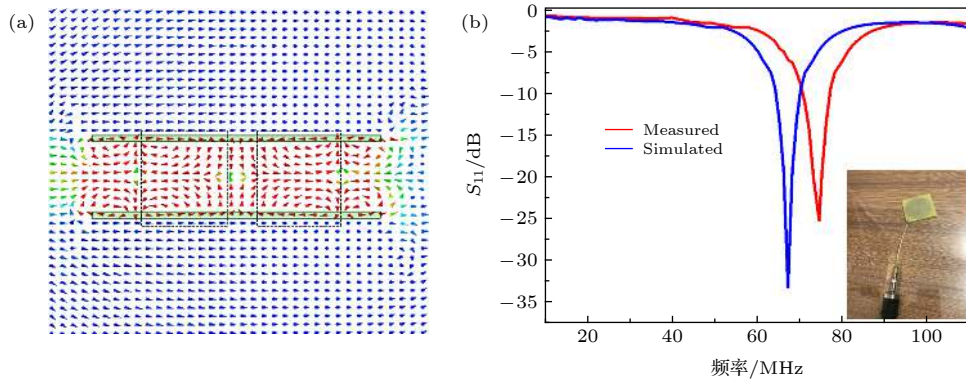


图2 (a) 本文设计的天线结构的  $X$ - $Z$  平面磁场分布图; (b) DHCRA 结构的  $S_{11}$  仿真结果与测试结果. 插图为 DHCRA 的实物照片  
 Fig. 2. (a) Magnetic field distribution in the  $X$ - $Z$  plane of our antenna structure; (b) simulation results and measurement results of the parameter  $S_{11}$  of the DHCRA structure. The inset shows the physical photograph of DHCRA.

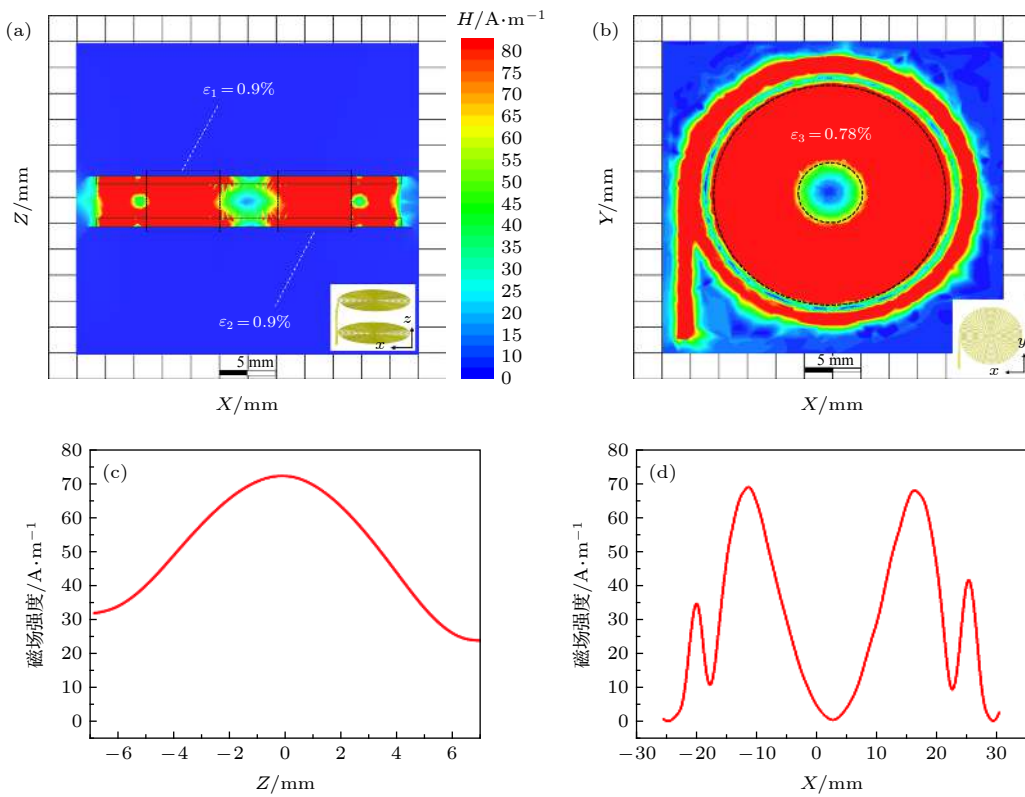


图3 (a) 70 MHz 下  $X$ - $Z$  平面的场强仿真分布图 (图中的  $\epsilon$  为非均匀度); (b) 70 MHz 下的  $X$ - $Y$  平面的场强仿真分布图; (c) 70 MHz 下的均匀区 ( $X = 14.86$  mm)  $Z$  轴方向场强仿真曲线图; (d) 70 MHz 下  $X$  轴方向的场强仿真曲线图

Fig. 3. (a) Simulated distribution of the magnetic field in the  $X$ - $Z$  plane at 70 MHz (In the figure  $\epsilon$  is the non-uniformity); (b) simulated distribution of magnetic field in the  $X$ - $Y$  plane at 70 MHz; (c) simulation curve of magnetic field in the  $X$ -axis direction at 70 MHz; (d) simulation curve of magnetic field in the  $Z$ -axis direction of the uniform zone ( $X = 14.68$  mm) at 70 MHz.

靠近  $Z$  轴两侧虚线框的部分场强分布较为集中. 根据非均匀性定义和标准计算方法, 通过提取图 3(a), (b) 虚线框内场强幅值点的最大值与最小值作差, 随后与平均场强做除法计算, 得到  $X$ - $Z$  平面两侧均匀区的非均匀度约为 0.9%,  $X$ - $Y$  平面环形均匀区的非均匀度约为 0.78%, 两侧均匀区非均匀度平均约为 0.9%.

在仿真过程中, 对于  $X$ - $Z$  平面两侧均匀区, 当线圈间距在 0.4—20.0 mm 之间时, 随着两线圈间距的增加非均匀度不断提高. 当线圈间距超过 20 mm 后由于场强大幅度减弱, 随着间距扩大非均匀度不断降低, 而非均匀度的线圈间距与线圈线条宽度对该平面非均匀性几乎无影响. 对于  $X$ - $Y$  平面的环形均匀区, 当线圈线条间距与宽度之和固

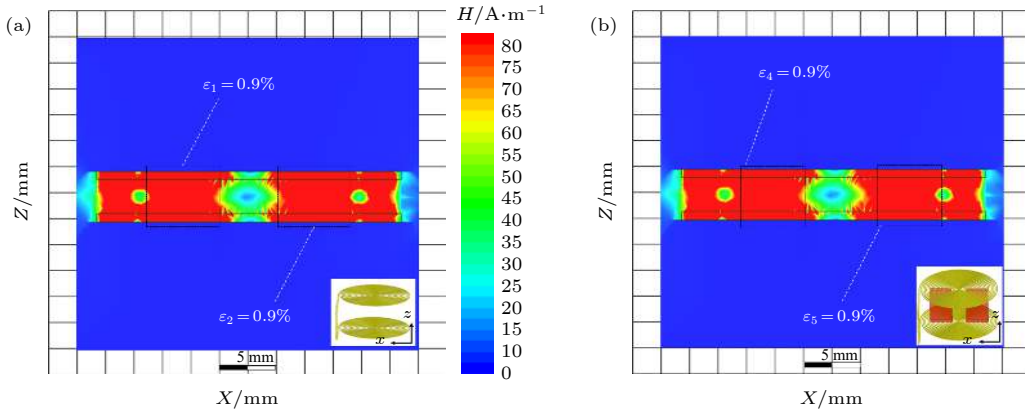


图 4 (a) 未加入样品时 X-Z 平面磁场仿真分布图; (b) 加入碳化硅样品后 X-Z 磁场仿真分布图

Fig. 4. (a) Simulation distribution of X-Z plane magnetic field without adding samples; (b) X-Z magnetic field simulation distribution after adding silicon carbide sample.

定时, 随着线宽的增加非均匀度不断减小, 而两线圈间距对该平面非均匀性无影响.

研究中将 DHCRA 天线结构中间部分设为中心, 以沿着中心的 X 轴为横坐标, 场强大小为纵坐标进行取点分析得到如图 3(d) 所示的场强分布图. 根据图 3(d) 得到 X 轴上均匀区的最大场强位于 +14.68 与 -14.2 mm 处, 取正向  $X = 14.68$  进行 Z 轴曲线绘制得到如图 3(c) 所示分布图. 可以看到沿着 Z 轴分布的中间区域为最大值, 辐射强度最大, 而由图 3(d) 可以看出沿着 X 轴的两侧各具有一个最值点.

同时, 由于待激发的碳化硅样品不与线圈结构相接触, 所以线圈工作产生的热量不会直接传到碳化硅样品, 从而有效隔离了线圈产生热量的干扰.

为了进一步研究样品结构对天线结构的非均匀性影响, 通过仿真研究了 DHCRA 天线结构加入碳化硅样品前后的场强分布特性, 结果如图 4 所示. 可以看出, 加入样品前后射频天线结构中场强的分布基本无变化, 因此, 碳化硅样品对所设计天线结构的非均匀性无影响, 为高可靠的 SiC 基传感与测量结构研制提供技术支撑.

### 3 不同天线结构性能测试

为了对比目前碳化硅空位自旋结构常用射频天线结构, 对比了单导线 (single copper antenna, SCA), 单线圈 (single loop antenna, SLA) 和 DHCRA 三种不同天线结构的射频信号辐射强度, 如图 5 所示. 在相同比例下得到 DHCRA 结构虚线区域的均匀场强更大, 而 SLA 与 SCA 结构分布较为

分散且强度较低. 而且, 相比于 SCA 与 SLA 结构, DHCRA 结构的均匀性分别提高了 55.889 倍与 42.889 倍, 场强分别提升 1.587 倍与 1.177 倍, 极大地增强了射频信号辐射的均匀性与强度, 为高灵敏度的碳化硅空位色心自旋基传感和测量方法提供了研究基础.

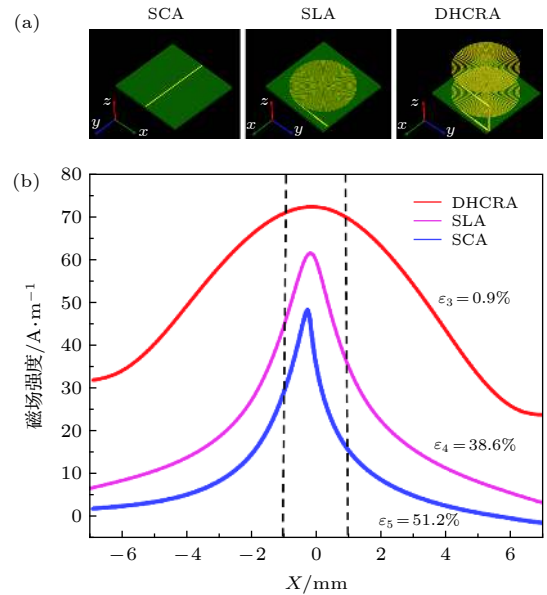


图 5 (a) SCA, SLA 与 DHCRA 的三维结构示意图; (b) 三种结构磁场强度仿真分析图与非均匀度参数示意图

Fig. 5. (a) Three-dimensional structure diagram of SCA, SLA and DHCRA; (b) three kinds of structure magnetic field strength simulation analysis diagram and non-uniformity parameter diagram.

### 4 结果与分析

为了验证双螺线圈射频共振天线结构的性能, 将该天线结构应用到碳化硅空位色心自旋磁共

振效应激发和应用测试中, 首先结合文献 [30,31] 得到直流磁力计灵敏度计算公式为

$$\eta = \frac{h}{g\mu_B} \frac{\Delta V}{C\sqrt{I_0}}, \quad (1)$$

其中,  $h$  是普朗克常数,  $g$  是朗德因子,  $\mu_B$  是玻尔磁子数, 均为常数.  $I_0$  是缺陷光致发光 (photoluminescence, PL) 率,  $C$  是光探测磁共振对比度 (optically detected magnetic resonance, ODMR),  $\Delta V$  是 ODMR 线宽. 实际应用中, 由于射频场不均匀, 导致硅空位缺陷结构的自旋磁共振效应展宽, 即  $\Delta V$  增加.

实验中, ODMR 测量系统如图 6(a) 所示, 首先通过 730 nm 的激光器激发碳化硅硅空位色心产生自旋磁共振荧光信号, 通过二向色镜进行荧光与激光信号分离, 利用  $NA = 0.8$  的物镜进行荧光信息收集, 并利用滤镜进一步滤除 730 nm 激光信号, 最终通过光电探测器检测磁共振信息. 硅空位色心的射频调控信号为 70 MHz, 输入信号的强度为 18 dBm.

实验中分别利用三种天线结构进行了实验对比分析. 如图 6(b) 所示, 可以看出基于 SCA 与

SLA 天线结构的硅空位自旋磁共振结构的对比度  $C$  分别为 0.2% 和 0.5%, 而基于本文设计的 DHCRA 天线结构的对比度  $C$  为 1.2%, 分别为 SCA 与 SLA 的 6 倍和 2.4 倍. 同时, 通过实验进行测得三种结构的带宽  $\Delta V$  均为 9 MHz, 因此, 本文提出的双螺旋圈天线结构的射频信号辐射效率更高.

利用信号调制解调方法, 得到硅空位色心结构的信噪比 (SNR), 在 70 MHz 恒定的射频频率下对荧光信号的波动进行了测量, 结果如图 6(c) 所示. 而根据哈密顿方程 [32] 可知, 当射频辐射的功率不均匀时, 碳化硅色心的自旋荧光信息波动较大, SNR 较低. 从图 6(c) 中可知, 基于 DHCRA 结构的碳化硅色心自旋磁共振信号噪声明显低于前两者, 相对 SCA 与 SLA 天线结构, SNR 分别提高了 8 倍与 2 倍.

为了研究碳化硅硅空位色心自旋磁传感器的灵敏度, 使用图 6(a) 搭建的信号调制实验系统, 结合相敏检测方法 [33–35], 研究传感器的灵敏度. 图 6(d) 所示为基于三个不同类型射频天线结构的解调曲线结果, 通过分析解调曲线的斜率 (图中  $k$  与  $R$  值), 得到基于 DHCRA 结构的磁传感器灵敏度相对

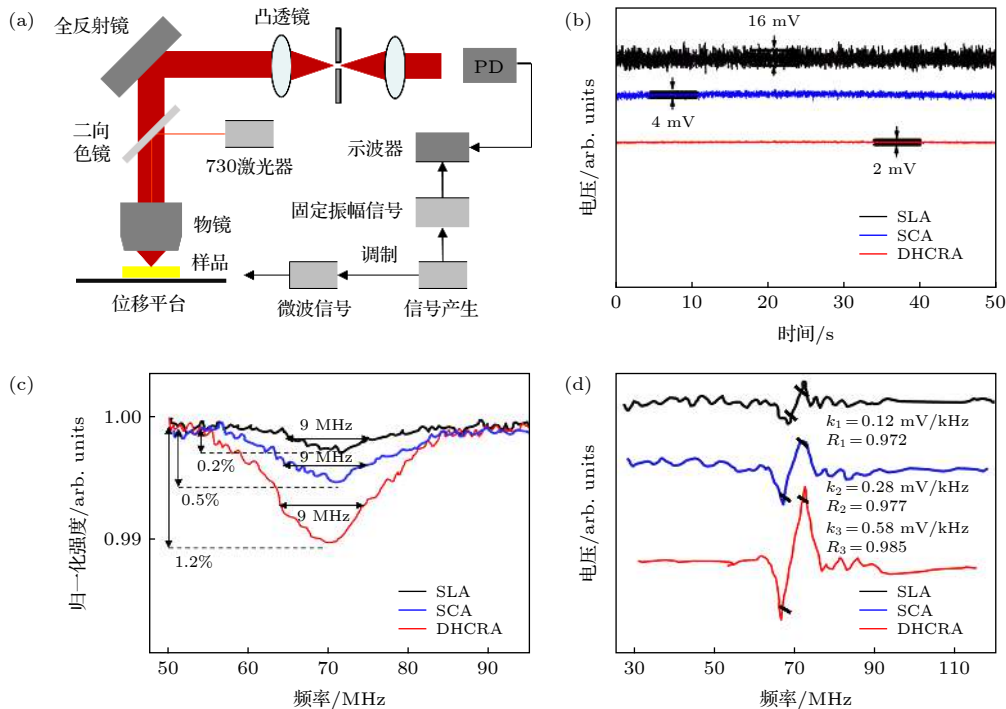


图 6 (a) 光学检测共振光路与频率调制系统; (b) 三种结构的光学检测共振谱分布; (c) 70 MHz 共振频率下三种结构的噪声波动图; (d) 三种结构的解调测试结果图

Fig. 6. (a) Optical detection resonance light path and signal modulation system; (b) resonance spectrum distribution of three structures for optical detection; (c) noise fluctuation graphs of three structures at 70 MHz resonance frequency; (d) demodulation test results of three structures.

SCA 与 SLA 结构分别提高 4.833 倍与 2.071 倍, 因此, 基于 DHCRA 结构的硅空位色心自旋磁传感器具有更高的高灵敏度.

## 5 结 论

设计了一种用于提高碳化硅中硅空位自旋激发强度的双螺旋立体天线, 并进行了仿真分析与实验研究. 仿真中通过与另外两种天线结构进行对比, 得到三者的磁场分布图并进行了讨论分析, 得到本文设计的结构具有良好的均匀性与较高的辐射强度. 通过搭建光学测试平台, 验证了双螺线圈平行对称结构的均匀区达到  $\pi \times 375 \text{ mm}^2 \times 10 \text{ mm}$ , 辐射强度相对于单根直导线和单螺线圈分别提高了 56.889 倍和 1.587 倍, 传感器灵敏度分别提高了 4.833 倍和 2.071 倍. 本文结构提高了硅空位自旋传感测量灵敏度, 为高精度、芯片级自旋量子传感器件的制造提供了技术支撑, 对于高精度自旋量子传感器的设计和使用有很好的参考价值.

## 参考文献

- [1] Seo H, Falk A L, Klimov P V, Miao K C, Galli G, Awschalom D D 2016 *Nat. Commun.* **7** 12935
- [2] van der Heijden J, Kobayashi T, House M G, Salfi J, Barraud S, Lavieville R, Simmons M Y, Rogge S 2018 *Sci. Adv.* **4** aat9199
- [3] Widmann M, Niethammer M, Fedyanin D Y, Khrantsov I A, Rendler T, Booker I D, Hassan J U, Morioka N, Chen Y C, Ivanov I G, Nguyen Tien S, Ohshima T, Bockstedte M, Gali A, Bonato C, Lee S Y, Wrachtrup J 2019 *Nano Lett.* **19** 7173
- [4] Wang J, Zhou Y, Zhang X, Liu F, Li Y, Li K, Liu Z, Wang G, Gao W 2017 *Phys. Rev. Appl.* **7** 064021
- [5] Christle D J, Klimov P V, Casas C F d l, Szasz K, Ivady V, Jokubavicius V, Hassan J U, Syvajarvi M, Koehl W F, Ohshima T, Son N T, Janzen E, Gali A, Awschalom D D 2017 *Phys. Rev. X* **7** 021046
- [6] Dubrovkin A M, Qiang B, Salim T, Nam D, Zheludev N I, Wang Q J 2020 *Nat. Commun.* **11** 1863
- [7] Niethammer M, Widmann M, Rendler T, Morioka N, Chen Y C, Stoehr R, Ul Hassan J, Onoda S, Ohshima T, Lee S Y, Mukherjee A, Isoya J, Nguyen Tien S, Wrachtrup J 2019 *Nat. Commun.* **10** 5569
- [8] Awschalom D D, Hanson R, Wrachtrup J, Zhou B B 2018 *Nat. Photonics* **12** 516
- [9] Dzurak A 2011 *Nature* **479** 47
- [10] Li Q, Wang J F, Yan F F, Cheng Z D, Liu Z H, Zhou K, Guo L P, Zhou X, Zhang W P, Wang X X, Huang W, Xu J S, Li C F, Guo G C 2019 *Nanoscale* **11** 20554
- [11] Kraus H, Simin D, Kasper C, Suda Y, Kawabata S, Kada W, Honda T, Hijikata Y, Ohshima T, Dyakonov V, Astakhov G V 2017 *Nano Lett.* **17** 2865
- [12] Wang L, Guo H, Chen Y L, Wu D J, Zhao R, Liu W Y, Li C M, Xia M J, Zhao B B, Zhu Q, Tang J, Liu J 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 047601 (in Chinese) [王磊, 郭浩, 陈宇雷, 伍大锦, 赵锐, 刘文耀, 李春明, 夏美晶, 赵彬彬, 朱强, 唐军, 刘俊 2018 *物理学报* **67** 047601]
- [13] Chen Y C, Salter P S, Niethammer M, Widmann M, Kaiser F, Nagy R, Morioka N, Babin C, Erlekampf J, Berwian P, Booth M J, Wrachtrup J 2019 *Nano Lett.* **19** 2377
- [14] Soltamov V A, Kasper C, Poshakinskiy A V, Anisimov A N, Mokhov E N, Sperlich A, Tarasenko S A, Baranov P G, Astakhov G V, Dyakonov V 2019 *Nat. Commun.* **10** 1678
- [15] Scheuer J, Schwartz I, Mueller S, Chen Q, Dhand I, Plenio M B, Naydenov B, Jelezko F 2017 *Phys. Rev. B* **96** 174436
- [16] Glenn D R, Bucher D B, Lee J, Lukin M D, Park H, Walsworth R L 2018 *Nature* **555** 351
- [17] Laucht A, Kalra R, Simmons S, Dehollain J P, Muhonen J T, Mohiyaddin F A, Freer S, Hudson F E, Itoh K M, Jamieson D N, McCallum J C, Dzurak A S, Morello A 2017 *Nat. Nanotechnol.* **12** 61
- [18] Whiteley S J, Wolfowicz G, Anderson C P, Bourassa A, Ma H, Ye M, Koolstra G, Satzinger K J, Holt M V, Heremans F J, Cleland A N, Schuster D I, Galli G, Awschalom D D 2019 *Nat. Phys.* **15** 490
- [19] Nagy R, Niethammer M, Widmann M, Chen Y C, Udvarhelyi P, Bonato C, Hassan J U, Karlu R, Ivanov I G, Son N T, Maze J R, Ohshima T, Soykal Ö O, Gali Á, Lee S Y, Kaiser F, Wrachtrup J 2019 *Nat. Commun.* **10** 1954
- [20] Riedel D, Fuchs F, Kraus H, Váth S, Sperlich A, Dyakonov V, Soltamova A A, Baranov P G, Ilyin V A, Astakhov G V 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 226402
- [21] Peng S J, Liu Y, Ma W C, Shi F Z, Du J F 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 167601 (in Chinese) [彭世杰, 刘颖, 马文超, 石发展, 杜江峰 2018 *物理学报* **67** 167601]
- [22] Clevenson H, Trusheim M E, Teale C, Schroeder T, Braje D, Englund D 2015 *Nat. Phys.* **11** 393
- [23] Childress L, Dutt M V G, Taylor J M, Zibrov A S, Jelezko F, Wrachtrup J, Hemmer P R, Lukin M D 2006 *Science* **314** 281
- [24] Sasaki K, Monnai Y, Saijo S, Fujita R, Watanabe H, Ishi-Hayase J, Itoh K M, Abe E 2016 *Rev. Sci. Instrum.* **87** 053904
- [25] Kim D J, Jo E S, Cho Y K, Hur J, Kim C K, Kim C H, Park B, Kim D, Choi Y K 2018 *Sci. Rep.* **8** 14996
- [26] Tang L, Kocabas S E, Latif S, Okyay A K, Ly Gagnon D S, Saraswat K C, Miller D A B 2008 *Nat. Photonics* **2** 226
- [27] Frank M, Thorsell M, Enoksson P 2018 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **66** 2141
- [28] Liu C R, Guo Y X, Xiao S Q 2014 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **62** 6027
- [29] Morlaas C, Soumy B, Chabory A 2015 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **63** 4693
- [30] Rondin L, Tetienne J P, Hingant T, Roch J F, Maletinsky P, Jacques V 2014 *Rep. Prog. Phys.* **77** 056503
- [31] Blank A, Shapiro G, Fischer R, London P, Gershoni D 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 034102
- [32] Bauch E, Hart C A, Schloss J M, Turner M J, Barry J F, Kehayias P, Singh S, Walsworth R L 2018 *Phys. Rev. X* **8** 031025
- [33] El-Ella H A R, Ahmadi S, Wojciechowski A M, Huck A, Andersen U L 2017 *Opt. Express* **25** 14809
- [34] Rugar D, Budakian R, Mamin H J, Chui B W 2004 *Nature* **430** 329
- [35] Payne A, Ambal K, Boehme C, Williams C C 2015 *Phys. Rev. B* **91** 195433

# Methodology of improving sensitivity of silicon vacancy spin-based sensors based on double spiral coil RF resonance structure\*

Zhang Wen-Jie<sup>1)</sup> Liu Yu-Song<sup>1)</sup> Guo Hao<sup>1)†</sup> Han Xing-Cheng<sup>1)</sup>  
 Cai An-Jiang<sup>2)3)</sup> Li Sheng-Kun<sup>1)</sup> Zhao Peng-Fei<sup>1)</sup> Liu Jun<sup>1)</sup>

1) (*Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China*)

2) (*School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710311, China*)

3) (*Shaanxi Key Laboratory of Nanomaterials and Technology, Xi'an 710311, China*)

( Received 20 May 2020; revised manuscript received 26 June 2020 )

## Abstract

Due to the power instability and field non-uniformity of radio frequency (RF), microwave (MW) and laser signals, inhomogeneous broadening of spin magnetic resonance line causes the absorption to decrease in a nuclear resonance system, which can reduce the sensitivity of spin-based sensing and testing technology. In this paper, we propose and design a double solenoid coil RF resonance antenna structure. The nearly uniform RF field density is produced by the two solenoid coil antenna structures that are parallel to the symmetry axis. The size of the uniformity in the center region of double solenoid coil RF resonance antenna structure is about  $\pi \times 375 \text{ mm}^2 \times 10 \text{ mm}$ . And the non-uniformity is less than 0.9%. Comparing with a single straight wire antenna and the single solenoid coil RF resonance antenna structure, the uniformity is improved by about 56.889 times and 42.889 times, respectively. At the same time, based on the near-field mutual inductance coupled resonance effect, the intensities of RF field in the center region of the two-solenoid coil antenna structure is enhanced. Comparing with the single solenoid coil antenna structures, it is enhanced by about 1.587 times. And the equivalent sensitivity of the silicon vacancy color center spin based sensor is enhanced by about 4.833 times.

In the experiment, an optical detection magnetic resonance measurement system based on the spin magnetic resonance effect of silicon vacancy color center in single crystal SiC is built. Comparing with the single straight wire antenna and the single solenoid coil RF resonance antenna structure, the contrast of the silicon vacancy color center spin magnetic resonance signals of the double solenoid coil RF resonance antenna structure increases about 6 times and 2.4 times, respectively. The sensitivity of the spin-based sensor is increased by 4.833 times and 2.071 times through using the modulation and demodulation method, and the noise decreases by 8 times and twice. Hence, based on this double solenoid coil RF resonance antenna structure, the sensitivity of the silicon vacancy spin sensor can be improved. Combined with chip manufacturing technology of SiC wafer, it proves to be a potential approach to developing the high precision, chip scale spin sensor devices and measurement technology.

**Keywords:** silicon vacancy color center, RF resonant antenna, uniform field, spin sensing, sensitivity

**PACS:** 42.60.Da, 42.60.By, 42.87.-d, 42.50.-p

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200765

\* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFB0503100), the China Postdoctoral Innovative Talents Support Program (Grant No. BX20180276), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51805493, 51922009, 51727808, 51775522), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2018M641684), the Applied Basic Research Program in Shanxi Province, China (Grant Nos. 201801D221202, 201901D111011(ZD), 201801D121164), the Key R&D Program in Shanxi Province, China (Grant No. 201803D121067), the Key Laboratory Project Fund (Grant Nos. 6142001180410, 6142001180409), the Key Laboratory of Shanxi Province, China (Grant No. 201905D121001), the Foundation for Young Academic Leaders of North University of China (Grant No. QX201901), and the Shanxi "1331Project", China.

† Corresponding author. E-mail: [guohao@nuc.edu.cn](mailto:guohao@nuc.edu.cn)