

# 基于小型化多层方形螺旋谐振器的短波原子传感增强技术\*

林沂<sup>1)</sup> 周傲杰<sup>2)3)</sup> 毛瑞棋<sup>4)</sup> 郭靖<sup>5)</sup> 杨凯<sup>1)</sup> 付云起<sup>1)†</sup>

1) (国防科技大学电子科学学院, 长沙 410073)

2) (电磁信息控制与效应全国重点实验室, 成都 610091)

3) (中国航空工业集团公司成都飞机设计研究所, 成都 610091)

4) (多域数据协同处理与控制全国重点实验室, 北京 100080)

5) (复杂航空系统仿真重点实验室, 北京 100076)

(2025年11月14日收到; 2025年12月23日收到修改稿)

针对传统短波传感技术受热噪声灵敏度极限难以突破、天线尺寸庞大的瓶颈, 以及现有里德伯原子传感系统测量灵敏度待提升的问题, 开展基于小型化多层方形螺旋谐振器的短波原子传感增强技术研究. 该谐振器以传统超材料方形开口谐振环为基础, 结合陶瓷叠层绕线电感原理, 通过多层方形螺旋叠加和外延金属支臂连接平行金属板实现, 可响应多极化波且对右旋圆极化波增强效果最优. 通过参数优化, 明确方形螺旋边长、横截面积等关键参数对谐振特性的影响规律. 实验测试表明, 该谐振器电场增强倍数为3981倍(工作频率15.54 MHz), 将原子传感系统灵敏度提升至 $2.60 \text{ nV}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ . 利用外差法成功接收中国国际广播电台信号, 验证了该技术在短波通信接收中的实用价值.

**关键词:** 里德伯原子, 短波, 高灵敏度, 谐振器

**DOI:** 10.7498/aps.75.20251557

**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251557

## 1 引言

现阶段传统短波传感技术面临两大核心瓶颈<sup>[1,2]</sup>: 一是约翰逊-奈奎斯特噪声的固有限制, 导致系统难以突破热噪声带来的灵敏度下限; 二是天线尺寸需遵循 Chu 极限的约束, 短波天线往往需要数米级的庞大尺寸, 严重限制了设备的集成化与便携性. 基于里德伯原子的传感技术<sup>[3,4]</sup>为突破上述瓶颈提供了革命性方案, 该技术具备自校准、可溯源<sup>[5]</sup>、高灵敏度<sup>[6]</sup>、宽工作频带<sup>[7,8]</sup>、小尺寸探头<sup>[9]</sup>等核心优势, 已成为电子信息与量子信息交叉领域的研究热点. 目前, 基于该技术的原理样机已在多

个领域实现突破, 包括高精度电场探头<sup>[10,11]</sup>、基于原子能级调控的立体声播放器<sup>[12]</sup>、超宽频带频谱分析仪<sup>[7]</sup>以及频率梳光谱仪<sup>[13]</sup>, 充分验证了其技术潜力. 该技术通过原子能级的量子态变化获取电磁信息, 能规避自由电子热噪声的干扰, 理论灵敏度仅受限于量子噪声极限<sup>[14]</sup>, 有望突破传统电子学热噪声决定的接收机灵敏度极限. 然而, 受限于激光器功率抖动、原子热运动、原子碰撞等因素, 现有里德伯原子传感系统的灵敏度仍具有很大的提升空间.

引入高性能谐振器以增强原子与外部电场的耦合强度, 已成为该领域的重要研究方向之一<sup>[15-17]</sup>. Holloway 等<sup>[18]</sup>采用开口谐振环 (split ring resonator,

\* 国家自然科学基金 (批准号: 62401586, U24B2009) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yunqifu@nudt.edu.cn

SRR) 结构, 在 1.31 GHz 工作频率处实现 40 dB 的电场增强, 使原子传感器电场强度测量灵敏度提升 100 倍, 达到  $5.5 \mu\text{V}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ ; Yang 等<sup>[19]</sup> 提出本振端口集成式平行板波导谐振器, 在 638 MHz 工作频率处电长度仅为  $0.342\lambda$  ( $\lambda$  表示自由空间波长), 电场增强效果达 34 dB; Wu 等<sup>[20]</sup> 设计本振端口集成式分裂环谐振器, 谐振频率为 946 MHz、电尺寸为  $0.088\lambda$ , 电场增强为 32 dB, 对应的传感器灵敏度为  $213 \text{ nV}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ . 针对短波频段 (3—30 MHz), Mao 等<sup>[21]</sup> 提出适用于里德伯原子传感的小型化短波谐振器, 尺寸约  $0.0043\lambda \times 0.0035\lambda \times 0.007\lambda$ , 电场增强倍数高达 8633 倍 (78 dB), 使原子传感系统灵敏度达到  $17 \text{ nV}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$  (工作频率为 10.22 MHz). Zhou 等<sup>[22]</sup> 进一步提出小型化方形螺旋谐振器, 系统灵敏度进一步提升至  $2.60 \text{ nV}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$  (工作频率为 15.54 MHz), 但未详细阐述该谐振器的设计原理、参数优化方法及性能调控机制.

本文围绕小型化多层方形螺旋谐振器 (简称“多层螺旋谐振器”) 展开研究. 首先, 基于传统超材料 SRR 结构, 结合陶瓷叠层绕线电感的小型化原理, 提出多层方形螺旋谐振器的整体设计方案, 并分析其对不同极化波的响应特性; 然后, 通过多参数耦合仿真, 明确方形螺旋边长、横截面积、螺旋层数、谐振器高度及支臂距离等关键参数对谐振频率与电场增强倍数的影响规律, 形成完整的优化设计方法; 最后, 制作谐振器实物并构建实验系统, 通过电磁诱导透明 (electromagnetic induced transparency, EIT) 光谱测试验证其电场增强性能, 结合外差法测量系统灵敏度, 并基于该技术实现外场短波广播信号的接收演示, 最终验证该谐振器在短波原子传感性能增强方面的实用价值.

## 2 小型化多层方形螺旋谐振器的结构设计及极化特性分析

传统超材料中的 SRR 结构见图 1, Holloway 等<sup>[18]</sup> 在 SRR 结构基础上, 设计了用于原子微波测量的 SRR 电场增强结构, 其模型如图 1(b) 所示. SRR 电场增强结构通过电场作用使金属条之间产生电荷积累, 这些电荷在开口缝隙的对侧两端周期性聚集, 形成电容器, 进而与回路电感产生谐振. 通过在开口处增加一对平行金属板, 能够形成更大

的平行板电容, 电场聚集在平行金属板间, 形成电场局域增强. 原子气室形状通常为矩形或圆形, 平行金属板不仅能够充当回路中电容的主要部分, 而且能够为放置原子气室提供物理支撑. 在 SRR 电场增强结构基础上开展小型化设计时, 利用平行金属板作为回路电容主要部分 (图 1(c) 中黑色方框), 对连接平行金属板的环路进行设计, 调节回路中的电感主要部分 (图 1(c) 中红色方框), 即可实现电场增强结构的电感型小型化设计, 其设计方法与电感小型化设计方法较为相似, 二者均需提高电感值并减小回路的寄生电容, 进而在实现小型化的同时仍保证较好的电场增强倍数.

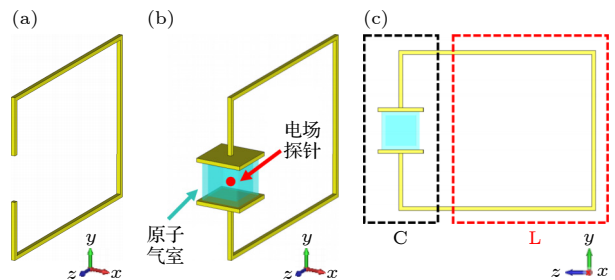


图 1 SRR 模型 (a) 传统 SRR; (b) SRR 电场增强结构; (c) 等效电容电感示意图

Fig. 1. SRR model: (a) Traditional SRR; (b) SRR electric field enhancement structure; (c) schematic diagram of equivalent capacitance and inductance.

SRR 电场增强结构的尺寸通常在  $0.25\lambda$ — $0.5\lambda$  之间, 对于短波频段, 将达到数米量级, 设计难度较大且实用性不强, 因此我们需要研究短波电场增强结构的小型化设计方法. 有效思路之一是借鉴电感的设计方法, 典型陶瓷叠层绕线电感结构如图 2(a) 所示, 不同螺旋的叠层在等效电路上可以看作电感的串联, 能够有效提高结构的电感值, 进而降低谐振频率, 实现小型化. 图 2(b) 为方形螺旋

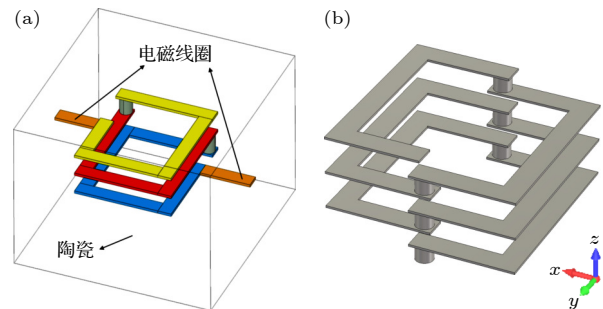


图 2 电感结构 (a) 陶瓷叠层绕线电感; (b) 方形螺旋单元

Fig. 2. Inductor structure: (a) Ceramic laminated wound inductor; (b) square spiral unit.

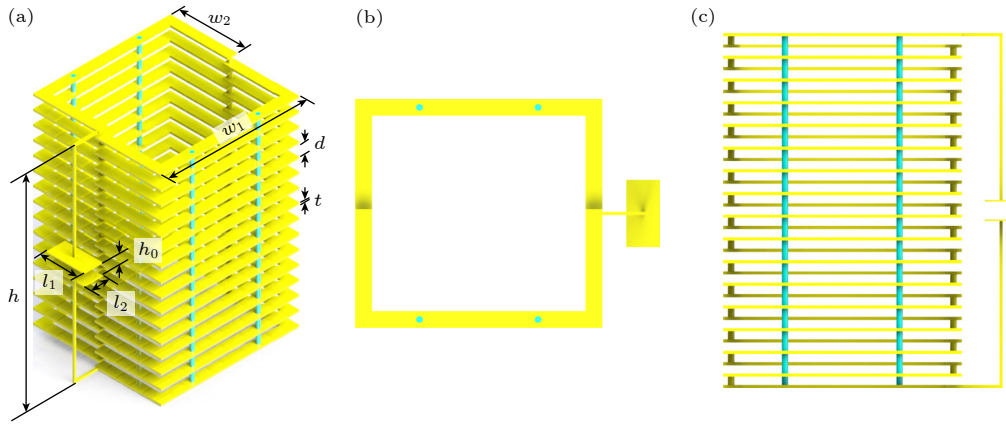


图 3 多层方形螺旋谐振器模型 (a) 正交视图; (b) 俯视图; (c) 侧视图

Fig. 3. Models of the miniaturized multi-layer square spiral resonator: (a) Orthogonal view; (b) top view; (c) side view.

单元, 该单元每层由方形螺旋的一半构成; 奇数层与偶数层的半个螺旋 (尺寸相同) 相互配合, 共同构成一个完整的方形螺旋, 层间通过铜柱连接. 通过螺旋单元的多层叠加, 以及外延金属支臂连接平行金属板, 构成具有多层方形螺旋的小型化电场增强结构, 其三视图模型如图 3 所示.

结合短波信号接收的应用需求, 需要考虑该谐振器的极化响应特性. 因为短波通信主要依靠电离层反射的方式进行远距离传播, 当无线电波通过电离层时, 由于电离层的各向异性, 不同极化状态的电磁波会受到不同程度的传播影响, 其极化状态可能会发生变化 [23]. 典型的短波发射信号为垂直线极化波, 经电离层反射后, 在法拉第旋转效应下线极化波将会变成椭圆极化波. 若谐振器对垂直极化波和水平极化波均能响应, 则可能获得更好的短波电场增强效果. 因此, 我们对多层方形螺旋谐振器的极化响应特性进行分析, 设置平面波激励的极化方式分别为垂直极化 (vertical linear polarization, VLP)、水平极化 (horizontal linear polarization, HLP)、右旋圆极化 (right circular polarization, RCP)、左旋圆极化 (left circular polarization, LCP), 得到不同极化来波情况下的电场增强倍数随频率的变化曲线. 如图 4 所示, 在谐振频率处, 上述 4 种极化波对应的电场增强倍数分别为 19769 倍、13242 倍、32691 倍、5416 倍. 因此, 该谐振器对垂直极化波和水平极化波均能响应, 对右旋圆极化波的响应最强、电场增强倍数最高, 对左旋圆极化波的响应最弱、电场增强倍数最低.

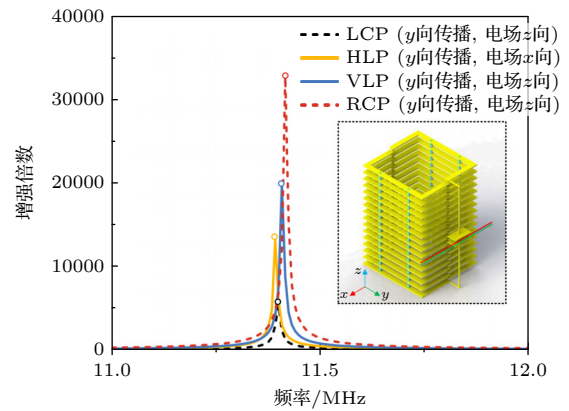


图 4 不同极化来波情况下, 电场增强倍数随频率的变化  
Fig. 4. Enhancement factor versus frequency under different polarized incident waves.

### 3 谐振器参数分析与性能优化

多层方形螺旋谐振器的多参数耦合分析和优化思路如图 5 所示. 螺旋部分是决定谐振器电感的主要部分, 平行金属板构成的电容器和谐振器的寄生电容是决定谐振器电容的主要部分. 我们首先分析单层螺旋单元的参数 (如方形螺旋边长、横截面积) 对谐振特性的影响. 其次分析整体螺旋部分, 包括螺旋层数、谐振器高度对谐振特性的影响. 最后对螺旋电感部分和平行板电容器部分的连接部分 (支臂距离) 进行分析.

改变方形螺旋的边长  $w_1$ , 从 150 mm 到 210 mm (步进为 20 mm) 扫描参数  $w_1$ , 获得不同方形螺旋边长下的电场增强倍数随频率的变化曲线, 如图 6(b) 所示. 需要注意的是, 为缩小仿真计算量, 通过迭代设置频率求解器的中心频点, 实现了特定小范围频率的仿真. 结果显示: 当  $w_1$  最短时, 该谐

振器的谐振频率最低,同时电场增强倍数最大;当  $w_1$  逐渐增大时,谐振频率随之降低,同时电场增强倍数随之增大,这是由于边长增大使螺旋面积与接收磁通量提升,螺旋电感增大,导致谐振频率向低频偏移且电场增强倍数提高。

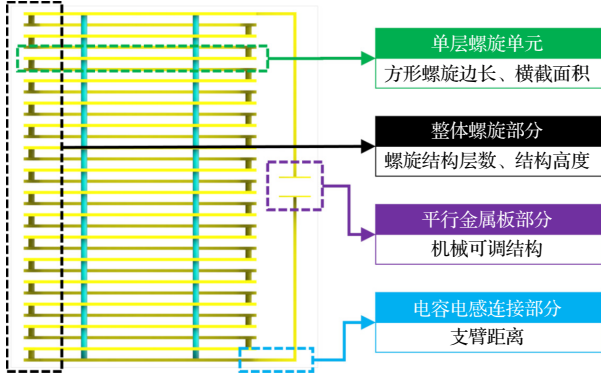


图 5 多层方形螺旋谐振器的多参数耦合分析和优化思路  
Fig. 5. Multi-parameter coupling analysis and optimization ideas for the miniaturized multi-layer square spiral resonator.

改变方形螺旋导体的横截边长  $w_3$  来改变横截面积,从 2 mm 到 10 mm (步进为 2 mm) 扫描参数  $w_3$ ,得到不同横截面积下电场增强倍数随频率的变化曲线,如图 7(b) 所示。结果显示,随着  $w_3$  增大,即横截面积增大,谐振器的电场增强倍数随之增大,这是因为横截面积增大会降低趋肤效应引起的导体损耗。

保持谐振器的高度不变,仅改变螺旋层数  $n$ ,仿真得到  $n = 16, n = 18, n = 22, n = 24$  时该谐振器电场增强倍数随频率的变化曲线,如图 8(b) 所示。结果显示,随螺旋层数  $n$  的增加,电场增强倍数呈现先降低后升高的变化趋势。同时,谐振频率随方形螺旋层数  $n$  的增大而降低:当  $n = 16$  时,谐振频率最高;当  $n = 24$  时,谐振频率最低。这是因为电感与螺旋线圈匝数的平方成正比,层数增加会导致电感增大;且在谐振器高度不变的情况下,层数增加会使层间距离缩小,进而增大层间寄生电容,最终导致谐振频率降低。

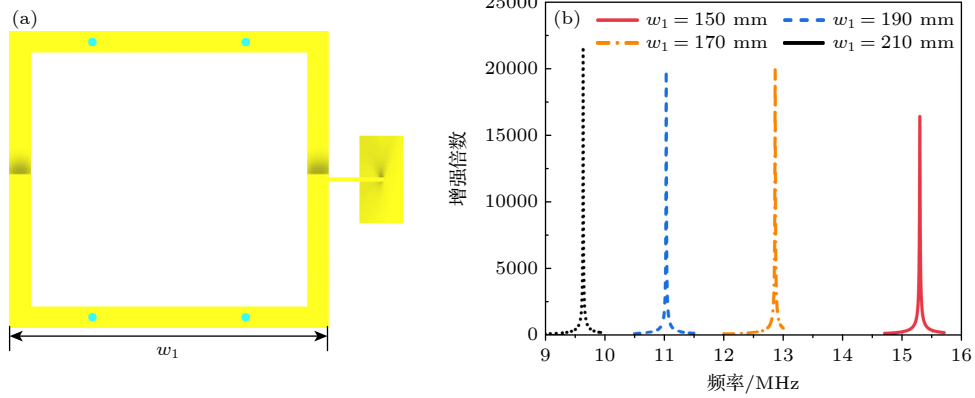


图 6 方形螺旋边长对谐振器性能的影响 (a) 方形螺旋边长  $w_1$ ; (b) 电场增强倍数随频率的变化  
Fig. 6. Influence of square spiral side length on resonator performance: (a) Square spiral side length  $w_1$ ; (b) enhancement factor versus frequency.

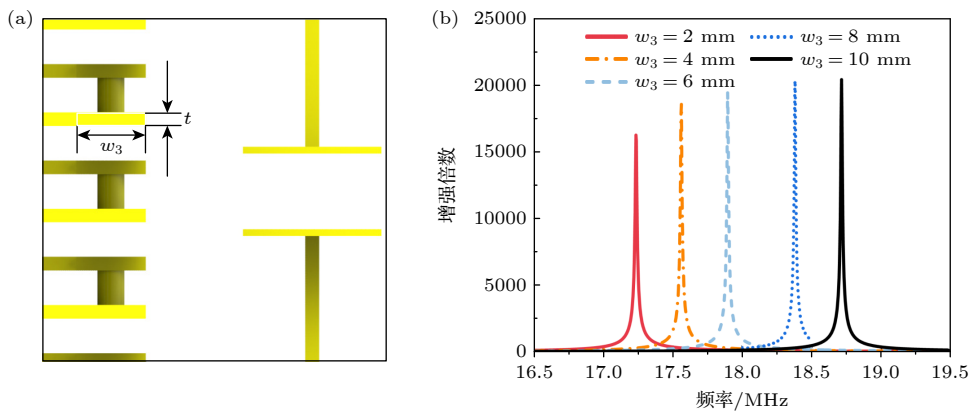


图 7 方形螺旋横截面积对谐振器性能的影响 (a) 方形螺旋横截边长  $w_3$ ; (b) 电场增强倍数随频率的变化  
Fig. 7. Influence of square spiral cross-sectional area on resonator performance: (a) Square spiral cross-sectional side length  $w_3$ ; (b) enhancement factor versus frequency.

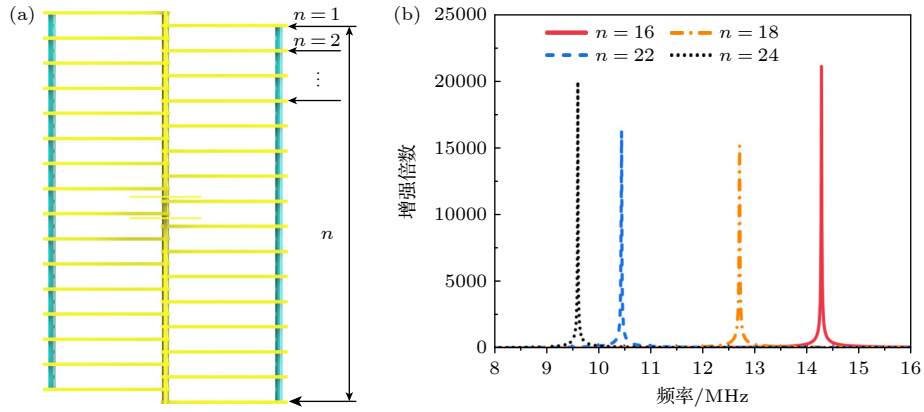


图 8 螺旋层数对结构性能的影响 (a) 螺旋层数  $n$ ; (b) 电场增强倍数随频率的变化

Fig. 8. Influence of spiral layer number on structure performance: (a) Spiral layer number  $n$ ; (b) curves of enhancement factor versus frequency.

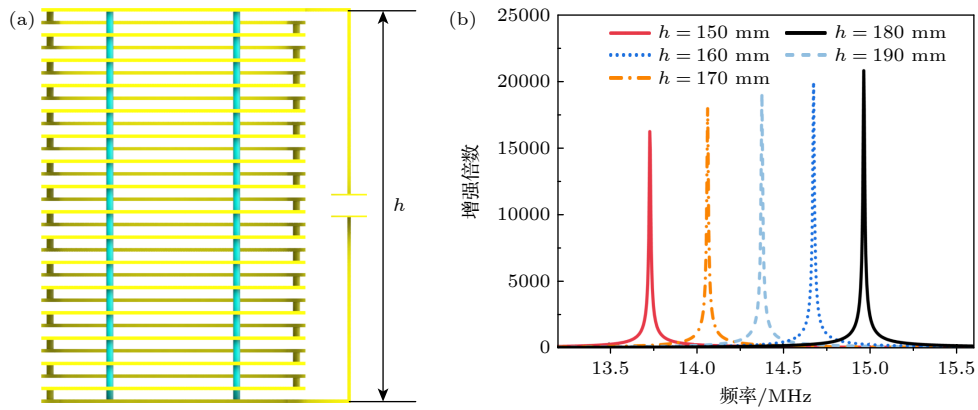


图 9 谐振器高度对性能的影响 (a) 谐振器高度  $h$ ; (b) 电场增强倍数随频率的变化

Fig. 9. Influence of resonator height on performance: (a) Resonator height  $h$ ; (b) enhancement factor versus frequency.

保持螺旋层数  $n = 16$ , 改变谐振器高度  $h$ , 从 150 mm 到 190 mm (步进为 10 mm) 扫描参数  $h$ , 得到不同谐振器高度下电场增强倍数随频率的变化曲线, 如图 9(b) 所示. 结果显示, 随着谐振器高度的不断增大, 谐振频率随之增大, 且电场增强倍数也不断变大. 这是由于螺旋部分的电感值与谐振器高度成负相关, 即电感值随谐振器高度的增大而降低, 进而导致谐振频率的升高.

最后, 对连接电感部分和电容部分的支臂进行仿真分析, 改变连接支臂距离  $l_3$ , 从 30 mm 到 70 mm (步进为 10 mm) 扫描参数  $l_3$ , 得到不同连接支臂距离下电场增强倍数随频率的变化曲线, 如图 10(b) 所示. 结果显示, 随着连接支臂距离的增大, 谐振频率下降, 电场增强倍数变化幅度较小. 这是因为连接支臂距离主要影响金属欧姆损耗、等效电感线长度、部分金属结构与平行金属板的寄生电容等, 进而导致谐振频率和电场增强倍数的变化.

结合本文短波广播接收应用验证的实际需求,

综合考虑谐振频率、电场增强倍数、谐振器大小后, 仿真优化获得的多层螺旋谐振器的结构参数列于表 1.

表 1 多层螺旋谐振器的结构参数

Table 1. Structural parameters of the miniaturized multi-layer square spiral resonator.

变量	$w_1$	$w_2$	$w_3$	$h$	$h_0$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$d$	$t$	$n$
数值/mm	146	70.5	1.5	220	13	40	20	26	5	2	16

## 4 测试结果与讨论

依据仿真优化结果制作完成的多层螺旋谐振器实物图如图 11 所示. 谐振器所采用的金属材料为黄铜, 由多层方形螺旋连接平行金属板构成. 在铜柱两侧的螺旋部分各添加两条贯穿螺旋部分的介质柱确保谐振器物理结构的稳定性, 介质柱材料为尼龙. 在谐振器制备中, 铜柱与每一层金属通过焊接连接, 焊接后通过万用表对各层金属依次测

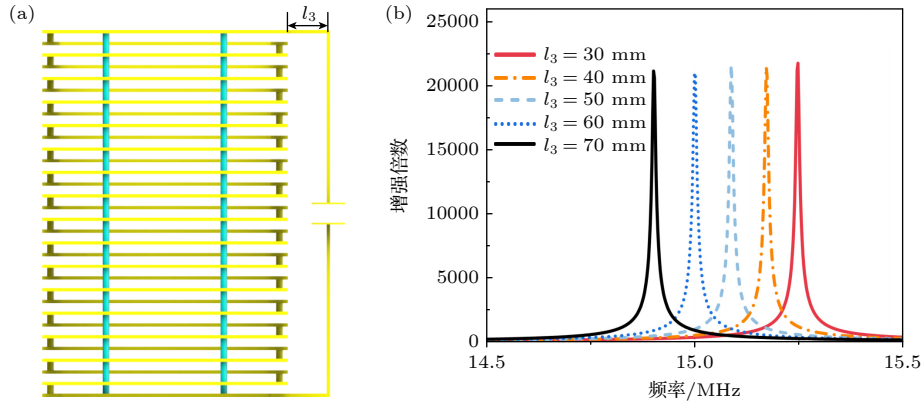


图 10 连接支臂距离对谐振器性能的影响 (a) 连接支臂距离  $l_3$ ; (b) 电场增强倍数随频率的变化

Fig. 10. Influence of connecting arm distance on resonator performance: (a) Connecting arm distance  $l_3$ ; (b) enhancement factor versus frequency.

试, 确保每一层连通, 使所有金属层导通. 此外, 为了应对加工误差导致的频率偏移, 在平行金属板两侧设计了调谐螺丝以对该谐振器的谐振频率进行微调, 使谐振器具备基于机械可调电容变化的工作带宽拓展能力.

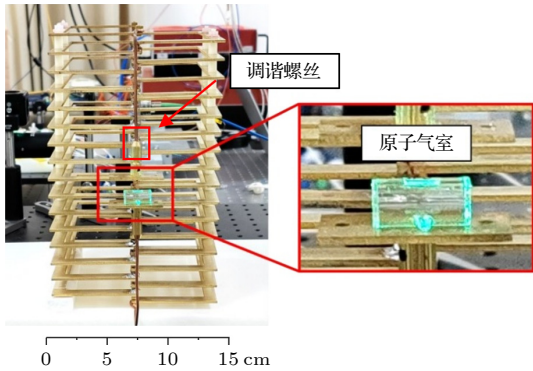


图 11 多层螺旋谐振器实物图

Fig. 11. Photo of the miniaturized multi-layer square spiral resonator.

基于多层螺旋谐振器的原子短波测量实验情况如图 12 所示, 采用双光子跃迁法制备  $^{133}\text{Cs}$  原子的里德伯态  $72\text{D}_{5/2}$ , 原子装载于长 20 mm、直径 10 mm 的圆柱形原子气室中, 探测光波长为 852 nm, 耦合光波长为 510 nm. 采用调制转移光谱锁定探测光频率, 探测光和耦合光由激光器发射, 经过偏振分束镜 (PBS) 与二向色镜 (DM) 后, 进入原子气室. 探测光激发原子从基态  $6\text{S}_{1/2}$  跃迁到中间态  $6\text{P}_{3/2}$ , 耦合光激发原子从中间态  $6\text{P}_{3/2}$  跃迁至里德伯态  $72\text{D}_{5/2}$ . 两种激光的相对入射实现了里德伯态原子的制备, 并产生 EIT 效应, 探测光透射光谱进入光电探测器 (PD), 由 PD 将光信号

转换为电信号, 后接示波器或频谱仪得到所需信息. 两台信号源分别提供待测信号和本振信号, 二者通过功率合成器馈入短波鞭天线后辐射至原子气室. 测试场景如图 12(b) 所示, 在光学平台构建空间光路, 保证探测光与耦合光光路对准, 调整谐振器高度使得光路能够穿过气室所在位置.

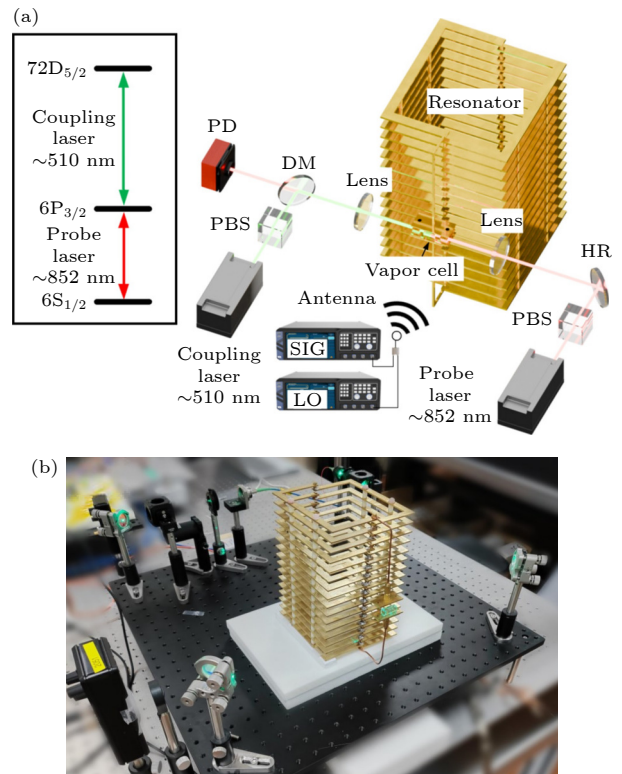


图 12 基于多层螺旋谐振器的原子短波测量实验 (a) 实验装置与原子能级图; (b) 测试场景

Fig. 12. Atomic short-wave measurement experiment based on the miniaturized multi-layer square spiral resonator: (a) Experimental setup and atomic energy level diagram; (b) the test scenario.

使用待测信号源 SIG 发射短波信号获得 EIT 光谱, 以测量谐振器的谐振频率及电场增强倍数. 调整信号源功率至适宜值, 使 EIT 效应产生 Stark 频移但不出现分裂; 在此状态下, 固定信号源输出功率, 扫描其频率, 将 Stark 频移量最大时对应的频率定为谐振器的谐振频点, 经测试该频点为 15.56 MHz. EIT 光谱测试结果如图 13 所示, 黑色点线代表在没有外加短波信号情况下测量的参考 EIT 光谱, 其峰值位于耦合光失谐 0 MHz 处. 未加载谐振器时, 待测信号信号源输出功率为 -7 dBm, 此时对应的 Stark 频移量为 12.57 MHz, 其 EIT 光谱如图中黄色曲线所示. 加载谐振器后, 待测信号信号源输出功率降低至 -79 dBm, 仍能保持相同的 AC Stark 频移量, EIT 光谱如红色曲线所示. 信号源输出功率的显著差异表明, 加载谐振器可以将信号源输出功率降低 72 dB, 以检测到相同的 EIT 频移, 或在原子气室中实现相同的电场强度. 因此, 该谐振器的电场增强倍数为 72 dB, 即电场增强倍数为  $10^{72/20} = 3981.07$  倍.

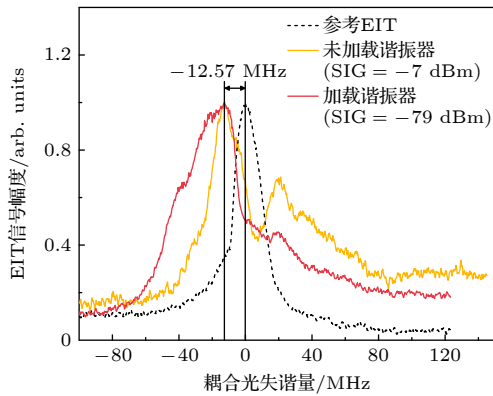


图 13 EIT 光谱测试结果  
Fig. 13. EIT spectrum test results.

仿真与测试获得的电场增强倍数随频率的变化曲线如图 14 所示, 在仿真结果中, 电场增强倍数为 78 dB, 谐振频率约为 15.56 MHz, 半高宽 (full width at half maximum, FWHM) 约为 0.01 MHz, 品质因数  $Q = f_0/\text{FWHM} \approx 1556$ . 在实测结果中, 电场增强倍数为 72 dB, 谐振频率约为 15.54 MHz, 半高宽 (瞬时带宽) 约为 0.02 MHz, 品质因数  $Q \approx 777$ . 需要说明的是, 实测结果中的电场增强倍数默认用 dB 值表示的原因是信号源输出功率为 dB 值. 实测和仿真的谐振频点仅相差 0.02 MHz, 但电场增强倍数、半高宽、品质因数存在明显差异, 主

要源于: 焊接引入的损耗降低电场增强倍数; 加工错位导致螺旋结构不完美, 缩窄带宽; 测试环境中金属结构的散射与耦合干扰.

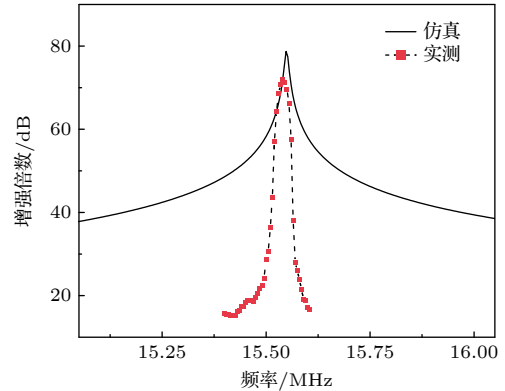


图 14 仿真与测试获得的电场增强倍数随频率的变化 (红色点线表示实测结果, 并利用洛伦兹拟合函数对实测数据进行拟合; 黑色曲线表示 CST 全波仿真得到的仿真结果)  
Fig. 14. Enhancement factor versus frequency obtained from simulation and test (the red dotted line represents the measured results, and the Lorentz fitting function is used to fit the measured data; the black curve represents the simulation results obtained from CST full-wave simulation).

接着, 通过锁定耦合光、添加本振信号, 采用外差法测量系统灵敏度. 待测信号频率  $f_{\text{SIG}}$  为 15.54 MHz, 设定差频信号频率为 10.15 kHz, 则本振信号频率  $f_{\text{LO}} = f_{\text{SIG}} + 10 \text{ kHz}$ . 未加载谐振器时, 最佳本振信号功率优化为 -21.5 dBm, 加载谐振器后, 最佳本振信号功率优化为 -86.5 dBm. 扫描待测信号信号源功率, 得到有无谐振器加载时差频信号功率随待测信号功率的变化曲线如图 15 所示. 结果显示, 加载谐振器可带来 72 dB 的原子外差测量增强效

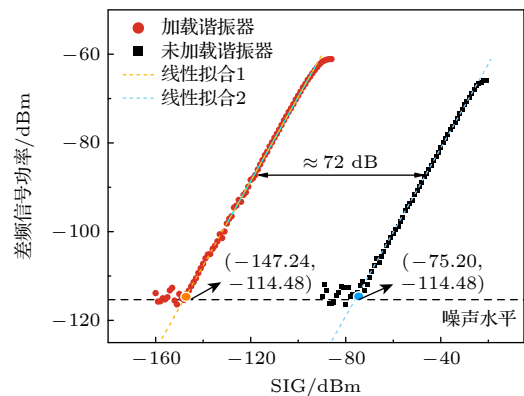


图 15 有无谐振器加载时差频信号功率随待测信号源功率的变化  
Fig. 15. Beat signal intensity versus SIG power with and without resonator.

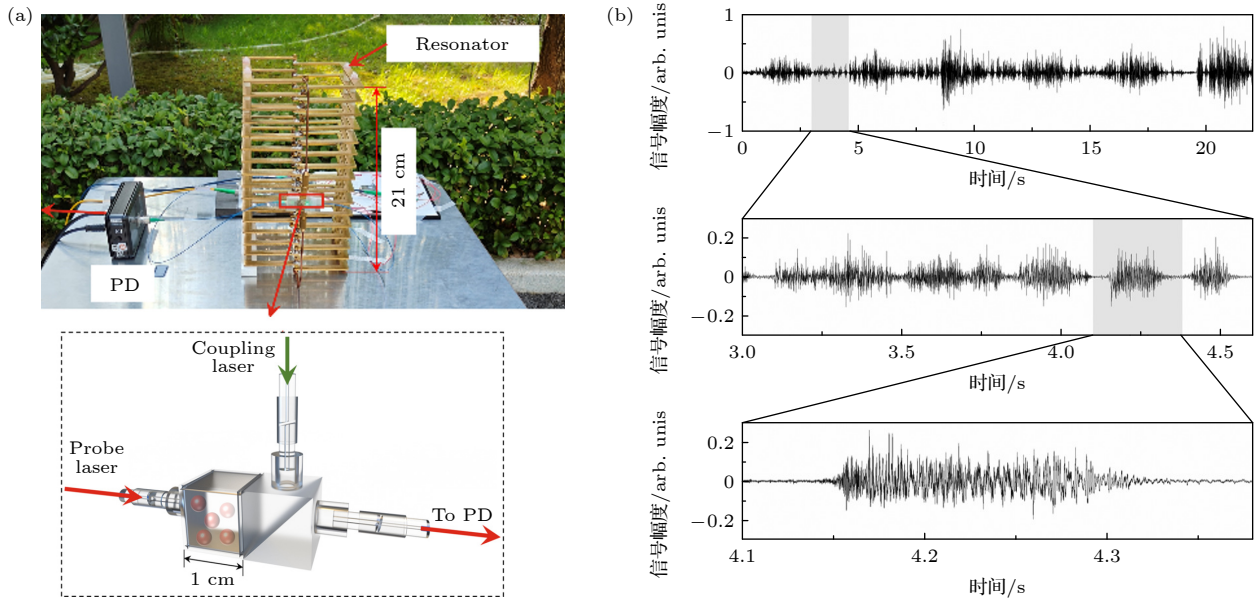


图 16 基于外差法构建外场短波广播接收应用演示实验 (a) 实验场景; (b) 基带信号时域波形

Fig. 16. Demonstration experiment of external short-wave broadcast reception based on heterodyne method: (a) The experimental scenario; (b) time-domain waveform of the baseband signal.

果, 与 EIT 光谱测试结果一致. 电场强度灵敏度的计算过程可参考文献 [21], 利用原子气室内的电场强度与信号源输出功率的校准关系, 并结合  $72D_{5/2}$  态的极化率 ( $\alpha = -7400.88 \text{ MHz}\cdot\text{cm}^2/\text{V}^2$ , 由 ARC 软件包计算得到) 计算, 未加载谐振器时, 灵敏度为  $10.39 \mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ , 加载谐振器后, 灵敏度提升至  $2.60 \text{ nV}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ .

## 5 短波广播接收应用验证

我们基于外差法构建外场短波广播接收应用演示实验场景, 对 13.85 MHz 的中国国际广播电台信号进行接收验证. 实验场景如图 16(a) 所示, 激光系统置于室内, 激光经光纤传输至室外; 室外设备 (光纤耦合原子气室 [10]、光电探测器、谐振器) 放置于推车以方便调整. 其中原子气室置于谐振器平行金属板之间, 通过调谐螺丝将谐振器的谐振频率微调至 13.85 MHz, 光电探测器将探测到的光信号转化为电信号, 这些信号直接连接至示波器, 或者通过扬声器进行音频信号的播放. 本实验在湖南长沙开展, 实验结果表明, 接收到的广播信号无需任何预处理, 即可通过扬声器播放出清晰可辨的语音, 其解调基带信号的时域波形如图 16(b) 所示 (相关音频源文件可联系作者获取).

## 6 总结

本文围绕短波频段里德伯原子传感灵敏度提升需求, 研究多层螺旋谐振器设计与应用. 首先, 基于传统 SRR 结构与陶瓷叠层绕线电感原理, 设计出由多层方形螺旋、外延金属支臂及平行金属板构成的小型化多层方形螺旋谐振器, 该结构可响应多极化波, 对右旋圆极化波增强效果最优. 其次, 通过参数分析明确各关键参数对谐振特性的影响, 优化后谐振器采用黄铜制作, 设计调谐装置应对频率偏移. 实验测试结果表明, 该谐振器在 15.54 MHz 工作频率下的电场增强倍数达 3981 倍 (72 dB), 将原子传感系统灵敏度从  $10.39 \mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$  提升至  $2.60 \text{ nV}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ . 最后, 利用外差法实现了外场 13.85 MHz 中国国际广播电台信号的接收, 其解调信号经扬声器可直接播放出清晰语音. 这一结果验证了该技术在短波通信等领域的应用价值, 有望为短波通信、短波测向等领域的前沿技术发展提供技术支撑. 下一步, 可进一步优化谐振器结构, 平衡灵敏度与瞬时带宽、工作带宽等综合性能, 以最大限度发挥原子传感的宽频带响应优势.

## 参考文献

[1] Chu L J 1948 *J. Appl. Phys.* **19** 1163

- [2] Cox K C, Meyer D H, Fatemi F K, Kunz P D 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 110502
- [3] Liu B, Zhang L H, Wang Q F, Ma Y, Han T Y, Liu Z K, Zhang Z Y, Shao S Y, Zhang J, Li Q, Chen H C, Han Y L, Ding D S, Shi B S 2025 *Chin. Phys. Lett.* **42** 053201
- [4] Xue J J, Li R N, Hu X S, Sun P S, Zhou H T, Zhang J X 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 084204 (in Chinese) [薛晶晶, 李若楠, 胡雪松, 孙培晟, 周海涛, 张俊香 2025 物理学报 **74** 084204]
- [5] Xiao D P, Chen L, Yan S, Wang H, Xu X L, Pan F, Wen D Y, Zhang H Q 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 243201 (in Chinese) [肖冬萍, 陈苓, 阎晟, 王浩, 许显立, 潘峰, 温东阳, 张淮清 2025 物理学报 **74** 243201]
- [6] Cai M H, Wei A M, Chen S S, Huang Y M 2025 *Chin. Phys. B* **34** 083201
- [7] Jin S C, Fan X Y, Wang X, Song Y, Sun Y 2025 *Chin. Phys. Lett.* **42** 110304
- [8] Zhang L H, Liu Z K, Liu B, Zhang Z Y, Guo G C, Ding D S, Shi B S 2022 *Phys. Rev. Appl.* **18** 014033
- [9] Borówka S, Mazelanik M, Wasilewski W, Parniak M 2025 *Nat. Commun.* **16** 8975
- [10] Lin Y, Wu F C, Mao R Q, Yao J W, Liu Y, An Q, Fu Y Q 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 170702 (in Chinese) [林沂, 吴逢川, 毛瑞棋, 姚佳伟, 刘焱, 安强, 付云起 2022 物理学报 **71** 170702]
- [11] Simons M T, Gordon J A, Holloway C L 2018 *Appl. Opt.* **57** 6456
- [12] Holloway C, Simons M, Haddab A H, Gordon J A, Anderson D A, Raithel G, Voran S 2020 *IEEE Antennas Propag. Mag.* **63** 63
- [13] Zhang L H, Liu Z K, Liu B, Wang Q F, Ma Y, Han T Y, Zhang Z Y, Chen H C, Shao S Y, Li Q, Zhang J, Ding D S, Shi B S 2024 *Chin. Opt. Lett.* **22** 080201
- [14] Meyer D H, Cox K C, Fatemi F K 2021 *Phys. Rev. A* **104** 043103
- [15] Wan W P, Lin Y, Yang K, Mao R Q, Zhou A J, Ding Z K, Fu Y Q 2026 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **25** 19
- [16] Ran R B, Liu Y, Ding Z K, Li Y X, Lin Y, Fu Y Q 2025 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **24** 2799
- [17] Li Y X, Lin Y, Ding Z K, Yang K, Ran R B, Wan Z Q, Fu Y Q 2025 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **24** 808
- [18] Holloway C L, Prajapati N, Artusio-Glimpse A B, Berweger S, Simons M T, Kasahara Y, Alù A, Ziolkowski R W 2022 *Appl. Phys. Lett.* **120** 204001
- [19] Yang K, Mao R Q, He L, Yao J W, Li J B, Sun Z S, Fu Y Q 2023 *EPJ Quantum Technol.* **10** 23
- [20] Wu B, Liao D W, Ding Z K, Yang K, Liu Y, Sang D, An Q, Fu Y Q 2024 *EPJ Quantum Technol.* **11** 22
- [21] Mao R Q, Lin Y, Zhou A J, Yang K, Fu Y Q 2024 *IEEE. Trans. Antennas. Propag.* **72** 8165
- [22] Zhou A J, Lin Y, Mao R Q, Yang K, Ding Z K, Wan W P, Fu Y Q 2025 *IEEE. Trans. Antennas. Propag.* **73** 10948
- [23] Tang W Q, Qu W Z, Li T J, You L, Xin J R, Yang S Q, Du Z D, Zhao F 2025 *Chin. J. Radio* **40** 323 (in Chinese) [唐文岐, 瞿文中, 李天昀, 游凌, 辛吉荣, 杨松桥, 杜政东, 赵菲 2025 电波科学学报 **40** 323]

# Short-wave atomic sensing enhancement technology based on miniaturized multi-layer square spiral resonator\*

LIN Yi<sup>1)</sup> ZHOU Aojie<sup>2)3)</sup> MAO Ruiqi<sup>4)</sup> GUO Jing<sup>5)</sup>  
 YANG Kai<sup>1)</sup> FU Yunqi<sup>1)†</sup>

1) (*College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

2) (*National Key Laboratory of Electromagnetic Information Control and Effects, Chengdu 610091, China*)

3) (*AVIC Chengdu Aircraft Design and Research Institute, Chengdu 610091, China*)

4) (*National Key Laboratory of Multi-domain Data Collaborative Processing and Control, Beijing 100080, China*)

5) (*Science and Technology on Complex Aviation System Simulation Laboratory, Beijing 100076, China*)

( Received 14 November 2025; revised manuscript received 23 December 2025 )

## Abstract

To address the long-standing bottlenecks of traditional short-wave sensing technologies, including the insurmountable sensitivity limit caused by Johnson-Nyquist thermal noise and the excessively bulky antenna size restricted by the Chu limit, as well as to further enhance the measurement sensitivity of existing Rydberg atom sensing systems, this study focuses on developing a miniaturized multi-layer square spiral resonator for short-wave atomic sensing enhancement. The proposed resonator is designed based on the traditional metamaterial split-ring resonator (SRR) structure and integrates the miniaturization principle of ceramic laminated wound inductors. It is composed of stacked multi-layer square spirals connected to parallel metal plates via epitaxial metal arms, which not only achieves device miniaturization but also enables responsive capability to multi-polarized waves, with the optimal enhancement effect on right-hand circularly polarized (RCP) waves. Systematic multi-parameter coupling simulations are conducted to clarify the influences of key structural parameters—such as square spiral side length, cross-sectional area, number of spiral layers, resonator height, and connecting arm distance—on the resonant frequency and electric field enhancement performance, thus forming a complete optimization design method. For experimental validation, a physical prototype of the resonator is fabricated using brass, with nylon dielectric pillars added for structural stability and tuning screws integrated to compensate for frequency deviations caused by manufacturing errors. Experimental validation uses two-photon transition to prepare the  $72D_{5/2}$  Rydberg state of  $^{133}\text{Cs}$  atoms, combined with electromagnetically induced transparency spectroscopy and heterodyne measurements. Results demonstrate that at 15.54 MHz, the resonator achieves an electric field enhancement factor of 3981 (corresponding to 72 dB), boosting the system's sensitivity from  $10.39 \mu\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$  to  $2.60 \text{ nV}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ . Outdoor tests successfully receive the 13.85 MHz signal from China Radio International via the heterodyne method, with the demodulated signal producing clear audio output without preprocessing. This miniaturized resonator enhances atom-electric field coupling, breaking through the limitations of traditional short-wave sensing and providing technical support for short-wave communication and direction-finding applications. Future work will optimize the structure to balance sensitivity and bandwidth.

**Keywords:** Rydberg atom, short-wave, high sensitivity, resonator

**DOI:** [10.7498/aps.75.20251557](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251557)

**CSTR:** [32037.14.aps.75.20251557](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251557)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62401586, U24B2009).

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

## 基于小型化多层方形螺旋谐振器的短波原子传感增强技术

林沂 周傲杰 毛瑞棋 郭靖 杨凯 付云起

### Short-wave atomic sensing enhancement technology based on miniaturized multi-layer square spiral resonator

LIN Yi ZHOU Aojie MAO Ruiqi GUO Jing YANG Kai FU Yunqi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 090602 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251557

CSTR: 32037.14.aps.75.20251557

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251557>

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

#### 二维声学黑洞结构高灵敏度水听器

High-sensitivity hydrophone with two-dimensional acoustic black hole structure

物理学报. 2025, 74(19): 194301 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250741>

#### 基于人工表面等离激元的小型化电可调缺口带滤波器

Miniaturized electronically controlled notched band filter based on spoof surface plasmon polaritons

物理学报. 2024, 73(3): 034101 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231447>

#### 基于里德伯原子的Loran-C信号接收

Reception of Loran-C signals based on Rydberg atoms

物理学报. 2026, 75(3): 034101 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20250900>

#### 腔增强热里德伯原子光谱

Cavity-enhanced spectra of hot Rydberg atoms

物理学报. 2023, 72(8): 087801 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230039>

#### 基于里德伯原子Stark效应射频电场测量灵敏度研究

Sensitivity of radio-frequency electric field sensor based on Rydberg Stark effect

物理学报. 2024, 73(9): 093202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240162>

#### 里德伯原子幻零波长

Tune-out wavelengths of Rydberg atoms

物理学报. 2024, 73(13): 130701 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240397>