

用于原子磁强计的超表面集成反射型气室设计

史镛瑞¹, 雷程^{1*}, 梁庭^{1**}, 王涛龙¹, 刘士琳¹, 王丙寅², 陈国锋²¹中北大学动态测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051;²内蒙古动力机械研究所, 内蒙古 呼和浩特 010000

摘要 原子磁强计以其高灵敏度和成本低等优势受到了越来越多的关注,如今,进一步提高原子磁强计的芯片集成度已成为主要趋势,因为它有利于生物磁性测量与成像。但是,目前实现原子磁强计小型化的主要障碍是微加工原子气室的光学元件分立。鉴于此,笔者提出一种基于新兴超表面的超紧凑片上原子气室方案,该方案将超表面与各向异性腐蚀的单晶硅相结合,在保证高灵敏度的同时提高了原子气室的集成度。该方案能够对圆偏振入射光束进行光路操纵,效率可达到 80%。超表面采用厚度为 500 nm 的硅设计而成,可以通过基本的微加工工艺直接在原子气室上制造。所设计的新型原子气室具有集成度高、可大批量制造的优点,为未来生物磁性传感系统的发展提供了参考。

关键词 表面光学; 超表面; 异常折射; 原子气室; 原子磁强计; 光路集成

中图分类号 TP212; O562

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230700

1 引言

提取大脑信息对于监测人类生命体征和检测神经系统疾病非常重要。脑磁图技术是一种非侵入性技术,用于感知来自大脑神经元活动产生的磁场^[1]。目前已经开发了用于脑磁图测量的各种传感器,包括超导量子干涉器(SQUID)、磁通门磁强计、巨型磁阻传感器和原子磁强计。原子磁强计利用自旋极化的碱金属原子在外加磁场作用下产生的拉莫尔进动实现对外加磁场的测量,具有很高的灵敏度,而且不需要昂贵的低温系统。近年来,微加工原子磁强计备受关注,其具有体积小、成本低、性能高等优势,非常适合生物磁性测量^[2]。

微加工原子磁强计的核心设备是小型化的碱金属原子气室,碱金属原子在这里储存并与光产生相互作用。小型化碱金属原子气室可分为两类:基于玻璃成型的毫尺度玻璃碱金属原子气室和基于微机电系统(MEMS)工艺制造的芯片级碱金属原子气室。芯片级碱金属原子气室与毫尺度玻璃碱金属原子气室相比具有体积更小、成本更低、产量更高的优点。然而,基于芯片级碱金属原子气室的原子磁强计的信号强度受短光程长度的限制^[3-5],虽然人们已经提出了许多方法来克服这一限制^[6-8],但这些方法很难在芯片上实现所需的特殊光入射角^[9],而且这些方法需要复杂的结构,一致性难以保证^[10]。使用衍射光栅和反射镜的方法虽

然简化了光学系统,但是未利用的衍射阶会产生大约一半的总功率损耗,从而进一步降低了信噪比^[11]。总而言之,碱金属原子气室的光学结构集成仍然是一个重大挑战。

超表面由准二维人造金属或介电结构组成。通过在空间上排列具有亚波长尺度的基本单元,超表面可以为完整的波前操作提供相位不连续性,因此它可以精确地定制光的振幅、相位和偏振^[12-14]。与传统笨重的光学元件相比,超表面器件具有结构紧凑、功能多样、重量轻等突出优势。随着微纳光子学和纳米制造技术的发展,人造准二维电磁材料超表面的研究突飞猛进,并与当前的微纳米制造平台兼容,这使得光学系统小型化具有前所未有的广阔前景。基于 MEMS 工艺的碱金属原子气室大多采用玻璃-硅-玻璃三层阳极键合制备^[15-16],这种制备方法也为超表面片上集成提供了可能。最近,研究人员提出了很多超表面和原子气室集成的方案,如:Ropp 等^[17]提出了一种集成光子学和超表面光学器件的用于实现紧凑型铯原子钟的集成光学架构,其中超表面用于自由空间光束的复杂排列;Yang 等^[18]提出了一种使用超表面光学器件进行平衡旋光测量的原子磁强计,其中超表面用于偏振分束;王延正等^[19]提出了一种用于里德堡原子制备的双光束分离的超表面,它高效率地实现了 510 nm 可见光的 6° 偏转;Liang 等^[20]提出了一种原子磁强计超表面片上双光束方案,实现了 780 nm 入射光的 45° 偏转,效率为

收稿日期: 2023-04-10; 修回日期: 2023-05-16; 录用日期: 2023-05-25; 网络首发日期: 2023-07-04

基金项目: 山西省重点研发计划项目(202102030201001, 202102030201009)、中央引导地方科技发展资金(YDZX20201400001664)

通信作者: *leicheng@nuc.edu.cn; **liangtingnuc@nuc.edu.cn

70%。由此可见,目前大多数超表面与原子气室集成的研究集中于多光束泵浦与探测应用上。对于原子磁强计来说,虽然多光束泵浦与探测的方式能够提高信噪比,但是多余的激光器和光电探测器必然会增大系统的体积,这对于生物磁性测量设备是不利的。对于单光束泵浦与探测来说,提高信噪比的一种方法是在反射侧壁上微加工原子气室,以此来延长光学长度。相对于传统的微加工气室来说,这种方式不会增加额外的体积,而且更易于封装集成。但是这种方式需要特殊的光入射角,从而导致需要增加额外的光学元件来实现对入射光角度的调控,从而限制了它的应用。目前,较少有人关注在反射侧壁微加工原子气室的超表面光路集成方式。

本文提出了一种基于超表面的微加工碱金属原子气室光路集成的方案,该超表面可以实现湿法腐蚀长光学长度原子气室所需的 19.48° 的特殊偏转角,效率超过了 80%。与现有工作相比,所提超表面在实现较大偏转角度的同时保持着较高的效率。由于采用微加工平面结构,该装置可以直接粘合在原子气室的透明窗口上,使垂直入射的光以 19.48° 打到各向异性腐蚀的单晶硅侧壁上,在沿基板平面定向的空腔光路中引导水平入射的光束与原子作用。笔者设计的超表面与纳米制造平台兼容,为未来大规模制造提供了可能。这一简单、更容易集成的平面纳米器件发挥了传统笨重光学元件的作用,简化了当前碱金属原子气室颇具

挑战性的制造工艺。所提方法能够实现微型原子磁强计的全芯片集成,为未来高空间分辨率生物磁性成像和可穿戴原子设备的研发提供了重要参考。

2 基本原理

传统的原子磁强计示意图如图 1(a)所示。原子磁强计通常采用与碱金属原子 D1 线共振的圆偏振光打入原子气室使原子系综偏振,射频线圈驱动围绕环境磁场的原子自旋进动,通过光学方法检测自旋的最终方向,测得的拉莫尔频率用于确定环境磁场。磁强计依赖于原子能级的塞曼分裂,而不是超精细分裂。光泵浦是对粒子自旋自由度而不是能量自由度产生影响的过程。因此,泵浦光必须偏振,但不需要光谱滤波。在自旋进动的磁强计中,围绕环境磁场的原子自旋进动可由一对亥姆霍兹线圈驱动,亥姆霍兹线圈产生的环境磁场可以确定场的拉莫尔频率。光电二极管再次检测原子系统对所施加射频场的响应,所得信号用于将驱动振荡器稳定在拉莫尔频率上。但是,基于芯片级碱金属原子气室的原子磁强计信号强度受短光程长度的限制。已经开发的长光程原子气室如图 1(b)所示,对于该气室,虽然信号强度由于光程增大而明显增强,但是需要在光路中添加额外的分立光学元件,并且需要特定的角度,增加了封装难度,不利于原子磁强计的小型化和集成化,所以这类原子气室难以在实际中应用。

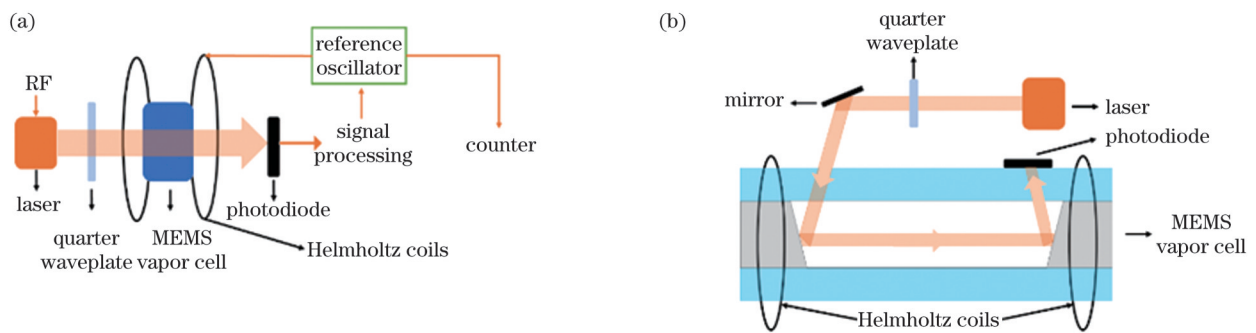


图 1 原子磁强计示意图。(a)传统原子气室架构;(b)长光程原子气室架构

Fig. 1 Schematic diagrams of the atomic magnetometer. (a) Conventional atomic vapor cell structure; (b) long-range atomic vapor cell structure

超表面异常折射中折射角和入射角之间的非线性关系为长光程原子气室的光路集成提供了新的机会。当光束入射到由许多具有不同传播相移的移相器组成的超表面时,每个相邻的移相器具有特定的相位差,在所有移相器的共同作用下,重建的波前相对于入射光的波前旋转指定角度,导致光束发生偏转。通过在碱金属原子气室表面集成超表面以诱导异常折射,可以使垂直入射的折射角发生变化。所设计的微加工碱金属原子气室如图 2 所示,激光器发出的光经四分之一波片转换成圆偏振光入射到超表面上,出射时由于超表面的相位梯度以一定的角度入射到各

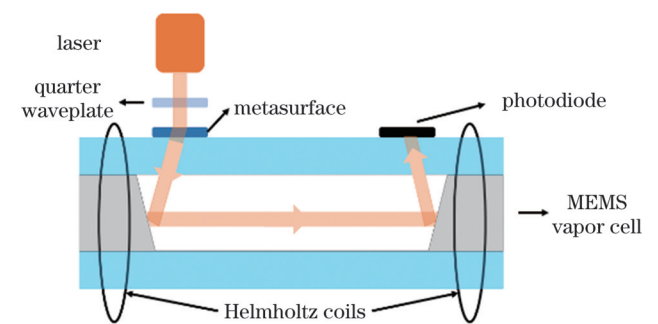


图 2 超表面集成方案示意图

Fig. 2 Diagram of metasurface integration solution

向异性腐蚀的单晶硅侧壁上,从而使光沿水平方向与气室中的碱金属原子作用。超表面采用不同直径的硅纳米柱诱导所需的光相位梯度。本文提出的基于广义斯涅耳定律的异常折射超表面的设计思路,用光学超表面替代反射镜,实现了对入射光的精确角度的异常折射,大大缩短了冗余光路,提高了原子气室的集成度。

2.1 理论基础

超表面中电磁波的调制不再取决于传播相位的空间积累,而是依赖于超原子的强共振或空间取向产生的突然相变。因此,超表面可用于控制空间中反射/透射波的相位、振幅和偏振。当界面处出现线性相位梯度时,广义斯涅耳定律^[21]为

$$\sin(\theta_t)n_t - \sin(\theta_i)n_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\Phi}{dx}, \quad (1)$$

式中: n_i 是入射介质的折射率; n_t 是折射介质的折射率; θ_i 是入射角; θ_t 是折射角; λ_0 是入射波长; $d\Phi/dx$ 表示界面处引入的相位突变。很明显,折射和入射之间存在非线性特性。所以,通过在两种不同介质之间引入相位梯度,就可以实现异常的折射角度。异常折射角度的影响因素主要包括入射波长、介质折射率和超表面引入的相位突变。

2.2 结构设计

选择合适的材料制备异常折射超表面的单元结构十分重要。硅材料在 894 nm 下的折射率为 3.673 且损耗低,并且硅材料的微纳加工工艺成熟,成本较低,因此选择硅作为产生相位梯度的材料。原子气室主要采用阳极键合法制备,以便产生玻璃-硅-玻璃的夹层结构。所以,超表面的基底材料选用玻璃可使超表面直接集成在原子气室上。基于以上分析,采用硅-玻璃架构进行超表面的设计。超表面的基本单元如图 3 所示。与 V 形天线、梯形和矩形纳米鳍不同,圆柱形状与相位的调制极化无关,所以为了保证泵浦光的圆偏振状态,将硅介质柱的形状设计成圆柱形。通过时域有限差分(FDTD)方法模拟相移和透射效率,对硅介质柱直径进行扫描,可以达到 $0 \sim 2\pi$ 的全范围相变,相位关系连续平滑。在 FDTD 计算中,设置 x 和 y 方向为周期性边界条件,并设置 z 方向为完全匹配的层边界

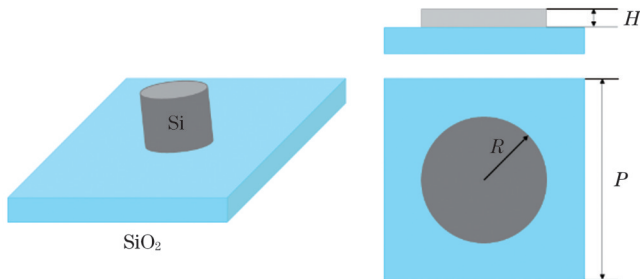


图 3 异常折射超表面基本单元示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the basic unit of the anomalous refractive metasurface

(PML)。y 偏振平面波入射到超表面,对其透射分量进行监测。

3 分析与讨论

在设计中,采用 Cs 原子的 D1 线跃迁频率作为泵浦光频率,即工作激光波长为 894 nm,单个超表面单元结构的周期设置为 537 nm。硅纳米柱的半径 R 从 50 nm 扫描到 250 nm,纳米柱的高度 H 为 500 nm。采用时域有限差分方法研究硅介质柱的半径对透射率的影响,结果如图 4 所示。由图 4 可以看出:当纳米柱的半径 R 为 50 nm 时,透射率最大,最大透射率为 96%;当纳米柱的半径 R 为 95 nm 时,透射率最小,为 61%。纳米柱的半径 R 在 95 nm 处时透射率最低是由于入射波激发了硅介质柱的共振,入射波的能量被吸收了一部分,所以透过率会变低。相位的调控主要通过改变硅介质柱的半径来实现,当介质柱高度一定时,介质柱半径不同时的相位分布如图 4 所示。可以看到,相位覆盖了整个 $0 \sim 2\pi$ 范围。

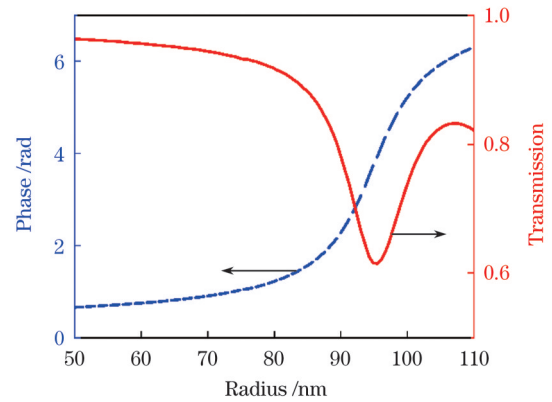


图 4 硅纳米柱直径不同时相位与透射率的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of phase and transmittance with different diameters of silicon nanopillars

根据确定的相径关系,以及对入射光透过率的要求,设计了包含不同直径介质柱阵列的超表面单元。超表面的布局设计如图 5 所示,每个超表面单元由 5×1 个单元构成,它们沿 x 方向分布。纳米柱的半径分别选择为 80、90、94、100、110 nm。超表面单元的周期 P_x 和 P_y 分别为 537 nm 和 2685 nm。

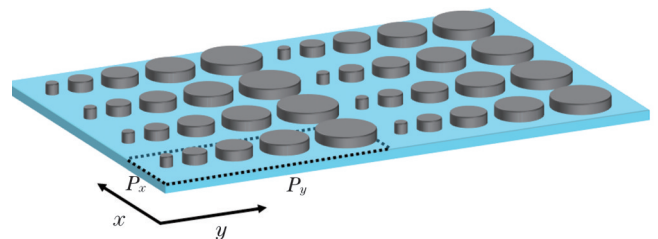


图 5 超表面结构布局示意图

Fig. 5 Schematic of metasurface structure layout

在圆偏振光的正常入射下, x - z 平面上的散射光场如图 6 所示。符号 k_i 和 k_r 分别代表入射和折射的波矢量。显然, 折射波前现在沿 19.48° 的特定角度传播, 这表明仿真结果与设计预期高度一致, 满足单晶硅各向异性腐蚀侧壁上的碱金属原子气室对入射激光角度的要求, 不必引入额外的反射镜, 有利于原子气室的进一步集成。圆偏振光入射光的电场矢量如图 7 所示, 图 7(a) 代表圆偏振光入射超表面之前的电场矢量图, 图 7(b) 代表入射之后的电场矢量图。由此可见, 圆偏振光入射超表面后, 虽然出射光能够保持较好的圆偏振度, 但是出射光的强度有所降低。同时, 分析可得 y 偏振光入射时的折射效率为 85%。当 x 偏振光入射时, 会产生 65% 的更低效率, 并且折射角保持不变。不同极化之间的轻微效率差异是由纳米柱沿着两个坐标轴的不同空间排列造成的。FDTD 计算得到的折射角都与使用式(1)得到的折射角非常吻合。

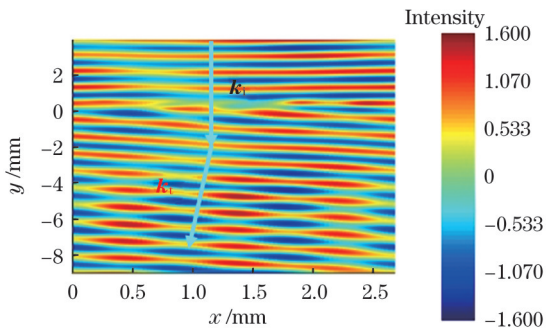


图 6 x - z 平面的折射光场分布图

Fig. 6 Typical refracted light field distribution in the x - z plane

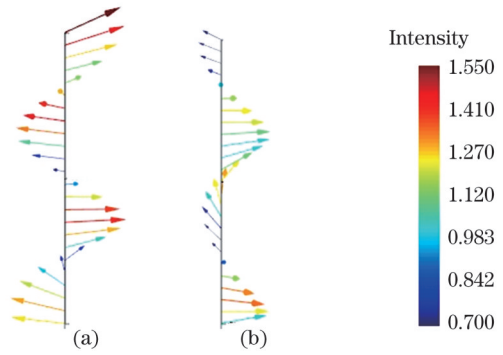


图 7 波传播方向的电场矢量图

Fig. 7 Vector diagram of the electric field in the direction of wave propagation

将上述设计的异常折射超表面与现有工作进行了比较。对于偏折角度来说, 所设计的超表面用于引导入射到基于单晶硅湿法腐蚀工艺制备的原子气室中的光, 而由于单晶硅湿法腐蚀工艺形成的硅反射侧壁与水平面的夹角为 54.74° , 要使入射光在原子气室中沿水平直线传播, 则要求入射光的角度必须为 19.48° 。针对这一要求, 通常采用增加反射镜或者使用衍射光栅的方式来实现, 但前者会增大系统的体积, 而后者会产生额外的衍射阶从而降低信噪比。笔者使用超表面实现 19.48° 偏转角方案相较于其他方案来说具有系统体积小且信噪比高的优点。

对于超表面的设计来说, 本工作同时兼顾了折射角度和效率之间的关系, 在保证所需折射角度的前提下, 实现了较高的效率水平。本工作与之前类似工作的比较如表 1 所示。

表 1 所提结构与之前报道结构的比较

Table 1 Comparison of the proposed structure with the previously reported structures

Structure	Function	Material	Waveband	Efficiency
Ref. [19]	Refraction 6°	$\text{SiO}_2/\text{LiNbO}_3$	Visible light	96.3%
Ref. [20]	Refraction 45°	$\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$	Infrared	$>70\%$
Ref. [22]	Refraction	SiO_2/Si	Infrared	$>78\%$
Ref. [23]	Refraction	Graphene	Infrared	40%
This work	Refraction 19.48°	SiO_2/Si	Infrared	$>80\%$

为了确定激光波长的影响, 在 FDTD 计算中将入射光波长从 7000 nm 扫描到 1000 nm。硅纳米柱直径改变时的相位延迟和透射率如图 8 所示。相位覆盖率仍然接近完整的 $0\sim 2\pi$ 范围, 透射率随着激光波长的增加而增大。因此, 所设计的超表面可以覆盖填充不同碱金属的原子气室(如钾、铷、铯原子气室)的波长范围。

4 结 论

随着原子传感和纳米加工技术的发展, 以及高分辨率生物磁性成像的迫切需求, 体积小、功耗低、成本

低的无自旋交换弛豫(SERF)原子磁强计的芯片集成越来越受到关注。本文针对微型磁强计敏感核心——碱金属原子气室的光学元件集成度不高的现状, 提出了一种在原子气室表面集成异常折射超表面的方案, 以实现入射光以 19.48° 的偏折角度入射到各向异性腐蚀的单晶硅侧壁上, 并在沿基板平面定向的空腔光路中引导水平入射的光束与原子作用。仿真结果表明, 该方法可以使圆偏振泵浦光束实现 19.48° 的偏转, 效率超过 80%。该超表面采用厚度为 500 nm 的硅设计而成, 与当前的微纳制造平台兼容, 具有大规模生产的潜力。同时, 高分辨率生物磁性成像仪器和便携式原

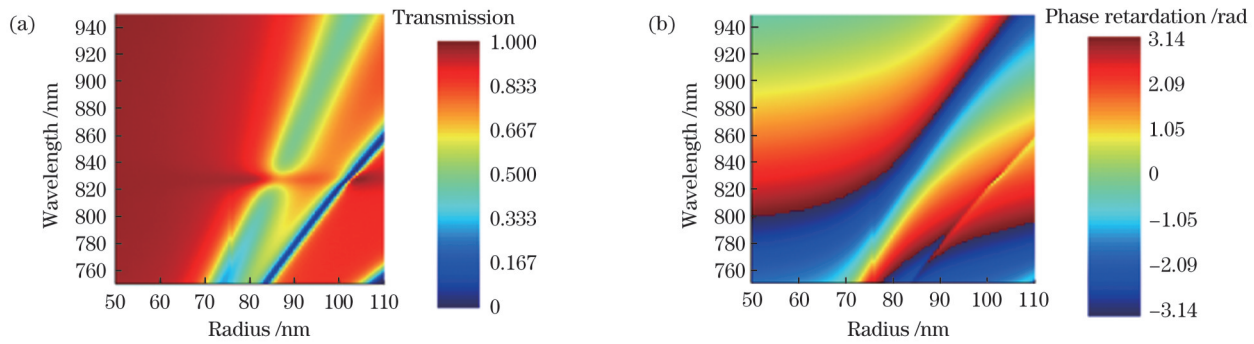


图 8 入射波长对光相位调控能力的影响。(a) 波长和硅纳米柱半径改变时的透射率; (b) 波长和硅纳米柱半径改变时的相位延迟
 Fig. 8 Effect of incident wavelength on optical phase modulation ability. (a) Transmittance when wavelength and silicon nanopillar radius are changed; (b) phase retardation when wavelength and silicon nanopillar radius are changed

子设备依赖于小型化磁强计的发展,所提方法通过芯片集成使微型磁强计的体积大幅减小,为未来生物磁性传感系统的发展提供了重要参考。

参 考 文 献

- [1] Baillet S. Magnetoencephalography for brain electrophysiology and imaging[J]. *Nature Neuroscience*, 2017, 20(3): 327-339.
- [2] Ji Y, Shang J T, Li G L, et al. Microfabricated shaped rubidium vapor cell for miniaturized atomic magnetometers[J]. *IEEE Sensors Letters*, 2020, 4(2): 2500104.
- [3] Knappe S, Alem O, Sheng D, et al. Microfabricated optically-pumped magnetometers[C]//2014 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)-Laser Science to Photonic Applications, June 8-13, 2014, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2014.
- [4] Sheng D, Li S, Dural N, et al. Subfemtotesla scalar atomic magnetometry using multipass cells[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(16): 160802.
- [5] 汤跃, 任子明, 李云超, 等. 应用于芯片原子钟的微碱金属气室制备与研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(4): 040201. Tang Y, Ren Z M, Li Y C, et al. Fabrication and study of micro alkali-metal vapor cell applied to chip scale atomic clock[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(4): 040201.
- [6] Chutani R, Maurice V, Passilly N, et al. Laser light routing in an elongated micromachined vapor cell with diffraction gratings for atomic clock applications[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 14001.
- [7] Nishino H, Toda M, Yano Y, et al. A reflection type vapor cell based on local anodic bonding of 45° mirrors for micro atomic clocks [C]//2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII), June 23-27, 2019, Berlin, Germany. New York: IEEE Press, 2019: 1530-1532.
- [8] Nishino H, Yano Y, Hara M, et al. Reflection-type vapor cell for micro atomic clocks using local anodic bonding of 45° mirrors[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(10): 2272-2275.
- [9] Han R Q, You Z, Zhang F, et al. Microfabricated vapor cells with reflective sidewalls for chip scale atomic sensors[J]. *Micromachines*, 2018, 9(4): 175.
- [10] Perez M A, Nguyen U, Knappe S, et al. Rubidium vapor cell with integrated Bragg reflectors for compact atomic MEMS[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, 154(2): 295-303.
- [11] Stern L, Bopp D G, Schima S A, et al. Chip-scale atomic diffractive optical elements[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 3156.
- [12] Hu J E, Bandyopadhyay S, Liu Y H, et al. A review on metasurface: from principle to smart metadevices[J]. *Frontiers in Physics*, 2021, 8: 586087.
- [13] Yao Z, Xia X C, Hou Y P, et al. Metasurface-enhanced optical lever sensitivity for atomic force microscopy[J]. *Nanotechnology*, 2019, 30(36): 365501.
- [14] 巴钟灵, 王雄. 具有梯度相位的高效宽带毫米波超表面结构[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(18): 181601. Ba Z L, Wang X. High-efficiency wideband millimeter wave metasurface structure with gradient phase[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(18): 181601.
- [15] Guo P, Meng H L, Dan L, et al. Wafer-level filling of MEMS vapor cells based on chemical reaction and evaporation[J]. *Micromachines*, 2022, 13(2): 217.
- [16] Wang X L, Ye M, Lu F, et al. Recent progress on micro-fabricated alkali metal vapor cells[J]. *Biosensors*, 2022, 12(3): 165.
- [17] Ropp C, Zhu W Q, Yulaev A, et al. Integrating planar photonics for multi-beam generation and atomic clock packaging on chip[J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12: 83.
- [18] Yang X T, Benelajla M, Carpenter S, et al. Analysis of atomic magnetometry using metasurface optics for balanced polarimetry [J]. *Optics Express*, 2023, 31(8): 13436-13446.
- [19] 王延正, 付云起, 林沂, 等. 光学超表面集成原子气室仿真设计 [J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(11): 1124001. Wang Y Z, Fu Y Q, Lin Y, et al. Design and simulation of optical metasurface integrated atomic vapor cell[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(11): 1124001.
- [20] Liang Z H, Zhou B Q, Lu J X, et al. Metasurface enabled on-chip double-beam scheme for SERF atomic magnetometer[J]. *Optics Communications*, 2022, 525: 128850.
- [21] Yu N F, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction [J]. *Science*, 2011, 334(6054): 333-337.
- [22] Ollanik A J, Smith J A, Belue M J, et al. High-efficiency all-dielectric Huygens metasurfaces from the ultraviolet to the infrared [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(4): 1351-1358.
- [23] Cheng H A, Chen S Q, Yu P, et al. Dynamically tunable broadband infrared anomalous refraction based on graphene metasurfaces[J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(12): 1743-1749.

Design of a Metasurface-Integrated Reflective Vapor Cell for Atomic Magnetometers

Shi Rongrui¹, Lei Cheng^{1*}, Liang Ting^{1**}, Wang Taolong¹, Liu Shilin¹, Wang Bingyin²,
Chen Guofeng²

¹State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;

²Inner Mongolia Power Machinery Institute, Hohhot 010000, Inner Mongolia, China

Abstract

Objective Magnetic brain data play a crucial role in neurological analysis and monitoring human brain health. Various sensors have been developed to detect magnetic fields resulting from brain activity. These include superconducting quantum interference devices (SQUID), fluxgate magnetometers, giant magnetoresistive sensors, and atomic magnetometers. Recently, micromachined atomic magnetometers have gained significant interest due to their small size, affordability, and superior performance. Central to these magnetometers is the miniaturized alkali metal atomic gas chamber. Chip-scale alkali metal atomic gas chambers present advantages like smaller size, reduced cost, and higher yield compared to their millimeter-scale glass counterparts. However, atomic magnetometers based on chip-scale alkali metal atomic gas chambers face challenges due to the short optical range length. While many solutions have been suggested, achieving a specific light incident angle on the chip remains intricate, and the fabrication consistency is hard to maintain. Thus, integrating optical systems within alkali-metal atomic gas chambers remains a predominant challenge. However, the rise of micro- and nano-photonics, coupled with advancements in nanofabrication, has spurred interest in artificial quasi-two-dimensional electromagnetic material hypersurfaces. These are compatible with modern micro- and nano-fabrication platforms, paving the way for unprecedented miniaturization of optical systems. Since most chip-scale alkali metal atomic gas chambers manufactured using MEMS-based processes involve the triple anodic bonding of glass-silica-glass, on-chip integration of metasurfaces becomes feasible. In this study, a strategy for optical path integration of micromachined alkali metal atomic gas chambers using the supersurface method is presented. This can achieve a deflection angle of 19.48° with over 80% efficiency. The micromachined planar structure of the device allows it to bond directly to the atomic gas chamber's transparent window. This ensures that the vertically incident light strikes the anisotropically corroded single-crystal silicon sidewall at 19.48° . Consequently, a horizontally incident beam is directed to interact with atoms along a cavity optical path. The supersurface design aligns with nanofabrication platforms, hinting at the potential for large-scale production in the future.

Methods In this design, silicon, exhibiting a high refractive index and low loss in the operating band, was utilized as the material for phase gradient generation. Initially, the effect of the radius of the silicon dielectric column on transmittance and phase was analyzed using the finite-domain difference method. The super-surface unit for phase gradient generation was designed based on the established phase diameter relationship and the requirements for the transmittance of the incident light. Subsequently, the scattered light field in the x - z plane under the normal incidence of y -polarized light was examined.

Results and Discussions The manipulation of the phase is primarily achieved through changing the radius of the silicon dielectric column. The layout of the anomalous refractive hypersurface is organized based on the results of the phase distribution (Fig. 4) using different radii of the dielectric column at a specific column height. The refractive wavefront now propagates along a distinct angle of 19.84° (Fig. 6). This indicates that the simulation results closely align with the design expectations. The requirement for the incident laser angle in the atomic gas chamber is met without introducing an additional reflector, simplifying further integration of the atomic gas chamber. Concurrently, the refractive efficiency is observed to be 85% upon normal incidence. However, when x -polarized light is incident, the efficiency drops to 65%, while the refraction angle remains unchanged. The efficiency discrepancy between the different polarizations stems from the distinct spatial alignments of the nanopillars along the two coordinate axes.

Conclusions In this paper, a scheme is proposed to integrate an anomalously refractive hypersurface on the surface of an alkali metal atomic gas chamber, the sensitive core of a miniature magnetometer. This integration aims to make incident light strike an anisotropically corroded single-crystal silicon sidewall at a deflection angle of 19.48° and direct the horizontally incident beam to interact with atoms in a cavity optical path oriented along the plane of the substrate. Simulation results indicate that this method achieves a deflection of the circularly polarized pump beam of 19.48° with an efficiency exceeding 80%. The super-surface, designed in silicon with a thickness of 500 nm, is compatible with current micro- and nano-manufacturing platforms, offering potential for mass production. The evolution of high-resolution biomagnetic imaging instruments and portable atomic devices hinges on the miniaturization of magnetometers. The proposed method integrates these magnetometers using a chip approach, significantly reducing their size and setting the stage for future advancements in biomagnetic sensing systems.

Key words optics at surfaces; metasurface; abnormal refraction; atomic vapor cell; atomic magnetometer; optical path integration