

激光与光电子学进展

光学超表面集成原子气室仿真设计

王延正, 付云起, 林沂, 安强*

国防科技大学电子科学学院电子科学系, 湖南 长沙 410073

摘要 碱金属原子气室是原子电场计、原子陀螺仪、磁力计、原子钟等原子传感器的基础核心部件,在气室玻壳上进行光路集成是实现原子传感器小型化的有效途径之一。本文针对原子传感器中光学元器件分立、光利用率不高的问题,基于广义斯涅耳定律和等效介质理论,设计了一种超表面结构,可实现不同波长激光的光束分离和高效透过,与原子气室集成,便于透过原子气室的光信号检测和后续处理,提高原子传感器的集成度和便携性,为其小型化提供可行性方案。以双光子激发制备铯里德堡原子为例,使用FDTD软件进行仿真分析,结果表明,超表面结构对510 nm耦合光偏折角约为 6° ,对852 nm探测光基本不产生影响,两束激光的透过率均在96.3%以上。

关键词 超表面; 光束偏折; 原子气室; 里德堡原子

中图分类号 TB34

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1124001

Design and Simulation of Optical Metasurface Integrated Atomic Vapor Cell

Wang Yanzheng, Fu Yunqi, Lin Yi, An Qiang*

Department of Electronic Sciences, College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China

Abstract The core component of atomic sensors is the alkali-metal atomic vapor cell, such as the atomic electric field meter, atomic gyroscope, atomic magnetometer, and atomic clock. Integrating the optical path on the glass shell of the atomic vapor cell is one of the most effective ways to realize the miniaturization of atomic sensors. Herein, to solve the problems associated with discrete optical components and low laser utilization in atomic sensors, a type of metasurface that can separate and transmit lasers with different wavelengths was designed based on the generalized Snell's law and equivalent medium theory. By integrating this metasurface with an atomic vapor cell, it can conveniently detect and process the laser passing through the vapor cell. In addition, the proposed method can improve the integration and portability of atomic sensors and provide an achievable scheme for the miniaturization of atomic sensors. Simulation analysis using finite-difference time-domain (FDTD) was conducted to excite a cesium Rydberg atom via a two-photon method. The results show that the metasurface can cause the 510-nm coupling laser to have a deflection angle of 6° without affecting the propagating direction of the 852-nm probe laser, and the transmittance of the two lasers exceeds 96.3%.

Key words metasurface; beam deflection; atomic vapor cell; Rydberg atom

1 引言

基于光与原子相互作用的原子传感器,包括原

子电场计、原子陀螺仪、磁力计、原子钟等,具有超高精度、小体积和低功耗等优点,在精密测量、导航、计时和授时等众多领域具有广泛应用^[1-2]。作为

收稿日期: 2021-07-12; 修回日期: 2021-07-21; 录用日期: 2021-07-29

基金项目: 国防科技大学科研计划(ZK19-20, ZK20-13)

通信作者: *anqiang18@nudt.edu.cn

原子传感器的基础核心部件,高性能微小型原子气室是现阶段国内外原子传感技术的研究热点。

目前,国内外多家单位在进行高性能微小型原子气室的研究工作,为原子传感器的实际应用奠定了基础^[1-2]。通过分析碱金属原子、工作气体、缓冲气体间的多体相互作用,研究原子气室内填充介质、结构与原子自旋极化弛豫的作用机理,指导实现更高性能的原子气室^[3];通过改进原子气室制备工艺和方法,提升冲制精度、洁净度、平整度、光学透明度,实现原子的高极化率^[4];通过充入缓冲气体、玻壳内壁镀膜等方法,提高气室内原子自旋弛豫时间,实现更稳定的宏观自旋磁矩^[5];采取玻璃胶工艺、圆片级玻璃吹制、多层阳极键合等技术,在保证气室性能的同时,进一步减小了原子气室的体积^[6-7]。然而,这并不能完全满足原子传感器的小型化需求。一般情况下,气室内的原子需要使用激光进行激发,这就需要对原子传感器的整体光路进行集成优化,以实现原子传感器的小型化。

光学超表面是一种由二维周期性亚波长结构阵列组成的人工材料,具有高度灵活的光响应能力。通过设计合适的亚波长结构,能够实现对入射光的相位、振幅、偏振态的完全调控^[8],这是实现原子传感器光路集成的有效手段之一。而且,原子气室的玻壳一般使用石英玻璃、高硼硅玻璃、蓝宝石等介质材料^[1-2],可直接作为光学超表面的基底材料进行设计,对原子传感器的整体光路进行集成优化。

本文以双光子激发里德堡原子为例,基于广义斯涅耳定律^[9-11]和等效介质理论^[12-15],在原子气室玻壳上设计了一种超表面结构,实现了不同波长激光的光束分离和高效透过。仿真结果表明,超表面结构对 510 nm 耦合光偏折角约为 6° ,对 852 nm 探测光基本不产生影响,两束激光的透过率均在 96.3% 以上。

2 基本原理

通常采取双光子激发的方式制备里德堡原子,使用两束特定波长的激光(探测光和耦合光)在原子气室内对向传输,实现原子基态、中间态、里德堡态之间的能级跃迁^[16-18],并在跃迁路径上发生量子相消干涉,产生电磁感应透明(Electromagnetically-induced transparency, EIT)效应。通过外加特定微波场,可产生 Autler-Townes(AT)分裂现象,实现微波场的精确测量^[16,19-20]。传统里德堡原子激发光

路示意图如图 1 所示。空间传输的探测光和耦合光经声光调制器(AOM)、半波片、格兰泰勒棱镜等器件调节后,对向入射原子气室,后经二向色镜分离,透射探测光至探测器。其中,HR 为高反镜,HT 为高透镜,半波片可将激光偏振方向调整至微波极化方向,保证两者平行,以满足测量条件。由图 1 可知,激发光路光学元器件分立、小型化难度高,极大地限制了原子传感器的应用场景。本文提出的超表面集成原子气室的结构设计方案,基于广义斯涅耳定律^[9-11]和等效介质理论^[12-15],使用全介质相位梯度光学超表面^[21-23]取代二向色镜,实现探测光、耦合光的高效透过和分离,便于透过原子气室的光信号检测和后续处理,提高原子传感器的集成度和便携性。

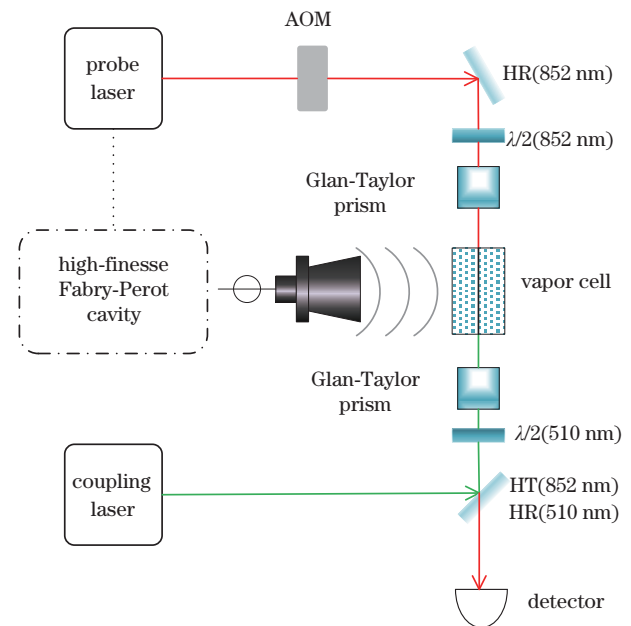


图 1 传统里德堡原子激发光路图

Fig. 1 Diagram of conventional Rydberg atomic excitation optical path

超表面集成原子气室结构和光路示意图如图 2 所示。两束激光在光纤中传输,经梯度折射率(GRIN)透镜准直、光学超表面调制后,进入原子气室中对向传输。与传统光路不同的是,耦合光以一定角度入射光学超表面,光学超表面使其传输方向发生偏折,在气室中与探测光对向传输,而该超表面对探测光的传输方向基本不产生影响,可直接入射光电探测器进行探测。

2.1 理论基础

光学超表面通过微纳结构与光的相互作用引入

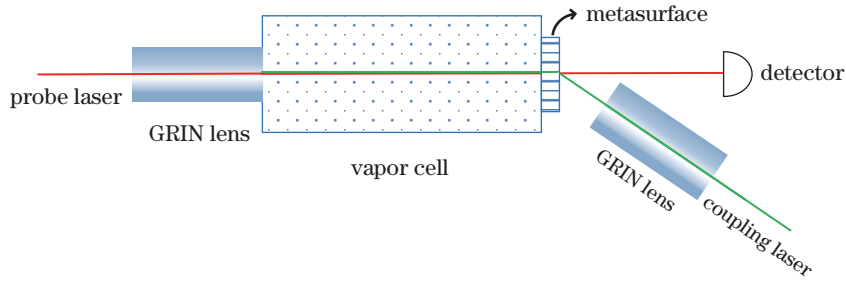


图 2 超表面集成原子气室结构和光路示意图

Fig. 2 Diagram of the structure and optical path of the metasurface integrated vapor cell

相位突变,在亚波长厚度内对光波前进行调控,进而调控光的传输方向、相位、偏振和振幅等^[8],其理论基础是广义斯涅耳折射定律^[9-11]和等效介质理论^[12-15]。

广义斯涅耳折射定律

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

式中: n_i 是入射介质折射率; n_t 是出射介质折射率; θ_i 是入射角; θ_t 是折射角; λ 是波长; $d\varphi/dx$ 是超表面引入的突变相位^[9-11],可由等效介质理论和麦克斯韦方程求得。那么,在两介质交界面处设置离散的梯度相位,即可实现折射角度在一定范围内的偏折。由式(1)可知,影响偏折角的因素包括介质折射率、波长和突变相位。

由等效介质理论可计算组合介质的等效折射率,常用的二元组合模型有Bruggeman模型^[24]

$$f \frac{\epsilon_1 - \epsilon_{\text{eff}}}{\epsilon_1 + 2\epsilon_{\text{eff}}} + (1-f) \frac{\epsilon_2 - \epsilon_{\text{eff}}}{\epsilon_2 + 2\epsilon_{\text{eff}}} = 0 \quad (2)$$

和Garnett模型^[25]

$$\epsilon_{\text{eff}} = \epsilon_2 \left[1 + 3f \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + 2\epsilon_2} \left/ \left(1 - f \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + 2\epsilon_2} \right) \right. \right], \quad (3)$$

式中: ϵ_1 、 ϵ_2 分别为两种介质的介电常数; f 为介电常数为 ϵ_1 的介质的体积与总体积之比^[24-25],即介质填充比。由式(2)和(3)可知,等效介电常数 ϵ_{eff} 与 f 成正比,折射率 $n_{\text{eff}} = \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ 与 f 成正比。对于常见的铌酸锂(LiNbO₃)、石英玻璃、氧化钛、氟化镁等介质材料,折射率与波长成反比,波长越短折射率越大,那么根据麦克斯韦方程组,同一亚波长结构,对较短波长的光的突变相位影响更大。

里德堡原子激发光路为保证激光的最大透过率,要求两束光垂直入射,即入射角 $\theta_i = 0$,根据式(1)可得

$$\sin \theta_t = \frac{1}{n_t} \frac{\lambda}{2\pi} \frac{d\varphi}{dx}. \quad (4)$$

对于两束波长不同的激光 λ_1 和 λ_2 ,且 $\lambda_1 > \lambda_2$,对应材料折射率 $n_{t1} < n_{t2}$,相变 $d\varphi_1 > d\varphi_2$,折射角分别为 θ_{t1} 和 θ_{t2} ,那么可得

$$\frac{\sin \theta_{t1}}{\sin \theta_{t2}} = \frac{n_{t2} \lambda_1 d\varphi_1}{n_{t1} \lambda_2 d\varphi_2}. \quad (5)$$

由式(5)可知,对于特定的设计波长, $\beta = (n_{t2} \lambda_1) / (n_{t1} \lambda_2)$ 为定值,两束光偏折程度的比值只由相变决定,定义两波长相变比值 Δ 为

$$\Delta = d\varphi_1 / d\varphi_2, \quad (6)$$

那么,当 $\Delta > \beta$ 时,超表面结构对 λ_1 偏折角更大,针对 λ_1 进行设计;当 $\Delta < \beta$ 时,超表面结构对 λ_2 偏折角更大,针对 λ_2 进行设计。

2.2 设计方法

目前实验中对里德堡原子的激发大多使用两束偏振方向平行的线偏振光,为保证激光的偏振特性,选择对光的偏振特性不敏感的圆柱形介质柱作为基本单元组成超表面结构单元^[8],如图3所示。图中 H 为介质柱高度、 D 为介质柱直径、 L 为单元结构尺寸、 M 为结构单元介质柱个数。由式(2)、(3)和(4)可知,偏折角主要由 f 决定,超表面结构单元参数中 D 对 f 影响最大,因此所设计的相位梯度超表面保持 H 和 L 不变, D 周期性变化。所使用的原

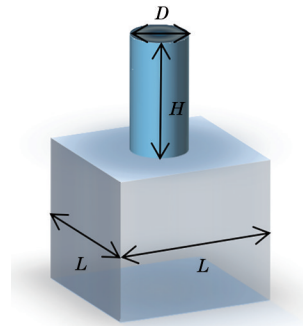


图 3 超表面基本单元结构示意图

Fig. 3 Diagram of the basic unit structure of metasurface

子为铯原子,基底材料为石英玻璃,介质柱材料为铌酸锂^[26]。目前最常用的原子气室玻壳为石英玻璃,可直接作为基底材料,铌酸锂对可见光、红外光的透射率均较高。针对激发铯里德堡原子的 510 nm 耦合光和 852 nm 探测光进行仿真设计,对应石英玻璃折射率分别为 1.4618 和 1.4525,铌酸锂折射率分别为 2.3355 和 2.2491。

为获得光学超表面的结构参数,根据 2.1 节内容进行理论分析并利用 FDTD 软件进行仿真计算。步骤如下:1) 仿真计算不同的 H 和 L 参数对探测光和耦合光透过率的影响;2) 根据现有微纳加工方法的限制,选择合适的介质柱高宽比,仿真计算 D 、 L 与突变相位之间的关系;3) 选取合适的 H 、 L ,确保突变相位覆盖 2π ;4) 选取合适的介质柱个数 M ,确定每个介质柱直径 D ;5) 仿真计算结构对探测光、耦合光传输方向的偏折角及透过率。

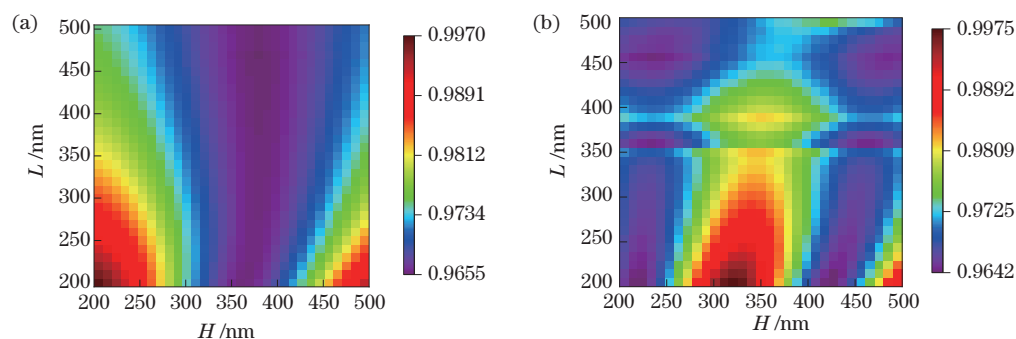


图 4 介质柱直径 D 为 150 nm 时超表面结构透过率 T 与 H 、 L 的关系。(a) 852 nm; (b) 510 nm

Fig. 4 Relation between T and H , L when the diameter of dielectric column D is 150 nm. (a) 852 nm; (b) 510 nm

根据式(2)和(3)可知,介质填充比 f 影响了超表面结构的等效介电常数,而 D^2 与介质填充比 f 成正比。因此,介质柱直径 D 的大小影响了超表面结构对光相位调制的能力。根据超表面的单元结构参数,介质柱直径 D 不能大于单元结构尺寸 L ($0 \leq D \leq L$)。为实现超表面结构对光束最大程度的偏折,仿真计算了介质柱高度 H 为 500 nm、结构单元尺寸 L 固定、介质柱直径 D 在 $0 \sim L$ 范围内变化时,结构单元所能引起的最大光相位变化,如表 1 所示。由表 1 可知,介质柱直径 D 变化引起的耦合光最大相位差能够达到 2π ,而探测光最大相位差仅为 1.4787π ,这就为超表面结构实现耦合光偏折、探测光不偏折的功能提供了可能。

由仿真结果可知,当单元结构尺寸 $L > 425$ nm 时,虽然可引起的耦合光相位变化大于 2π ,但在介质柱直径 $D > 350$ nm 时,探测光和耦合光会出现明

3 结果与讨论

为保证超表面结构的高透光率,需研究其单元结构尺寸 L 和介质柱高度 H 对两个波长的光透过率的影响,仿真结果如图 4 所示,其中介质柱直径 D 为 150 nm。由图 4(a)可以看出,探测光透过率随介质柱高度 H (200~500 nm) 的增大,出现先降后升的变化趋势;随着单元结构尺寸 L (200~500 nm) 的增大,探测光透过率逐渐降低。这主要是由光的干涉引起的,当 H 、 L 满足干涉相消的条件时,透过率 T 会增大;当 H 、 L 不满足干涉相消条件时,透过率 T 会产生不同程度的减小。而对于耦合光,随介质柱高度 H (200~500 nm) 的增大,其透过率出现类似正弦的规律性变化,随单元结构尺寸 L (200~500 nm) 的增大,总体呈现逐渐下降的趋势,但在 350~400 nm 范围内出现突变的情况,如图 4(b) 所示,这是因为部分激光产生谐振,导致透过率突然下降。

显的吸收峰,如图 5 所示。对比发现,随着 L 的增大,探测光发生突变的位置左移,即 D 逐渐减小;耦合光发生突变的位置右移,即 D 逐渐增大。出现明显吸收峰的主要原因是当超表面的结构尺寸与光的半波长相比拟时,会在超表面结构中产生谐振,耦合光损耗增大,而探测光在结构内几乎完全损耗。因此,在超表面结构设计中要充分考虑该谐振尺寸,避免光相位变化的突变,造成激光损耗过大,影响整体结构的光学效率。

基于超表面结构尺寸对透过率、相位变化、光学效率等因素的影响,考虑现有微纳加工工艺的能力^[27],设计了一种可实现耦合光传输方向偏折、探测光不偏折功能的超表面结构,如图 6 所示。其中,结构单元尺寸 L 为 375 nm、介质柱高度 H 为 500 nm,每个周期内介质柱数量为 8 个,直径 D 分别为 122, 145, 159, 172, 184, 202, 232, 288 nm,相邻介

表 1 介质柱高度 H 为 500 nm 时不同单元结构尺寸 L 对应的最大光相位变化仿真结果

Table 1 Simulation results of maximum optical phase difference corresponding to different metasurface structure size L when the height of dielectric column is 500 nm

L/nm	Max phase difference of coupling laser	Max phase difference of probe laser	Δ
300	2.2801π	1.1489π	1.9846
325	2.3194π	1.1661π	1.9890
350	2.4168π	1.1818π	2.0451
375	2.4836π	1.1983π	2.0727
400	2.4953π	1.2147π	2.0543
425	2.4229π	1.2054π	1.9378
450	2.5769π	1.4129π	1.8238
475	2.6767π	1.4787π	1.8102
500	2.6867π	1.4399π	1.8658

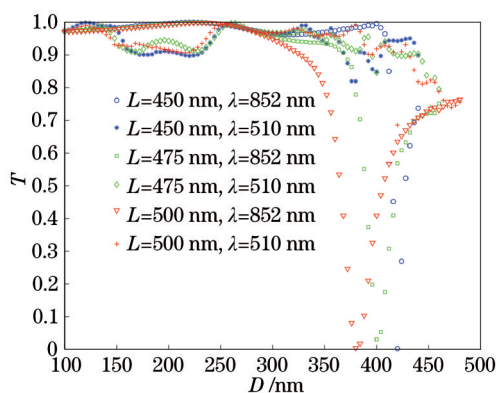


图 5 介质柱高度 H 为 500 nm 时两束激光的透过率

Fig. 5 Transmittance of the two lasers when the height of dielectric column is 500 nm

质柱引起的耦合光相位差为 $\pi/4$ 、探测光相位差为 0.239。对该超表面结构的功能进行了仿真计算，

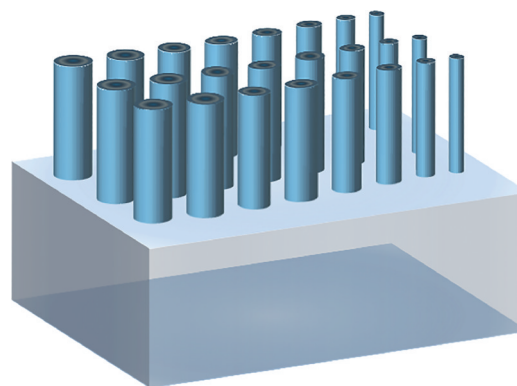


图 6 超表面周期结构示意图

Fig. 6 Diagram of period structure of metasurface

结果如图 7 所示,其中, k 为光传播方向矢量,超表面结构对耦合光的偏折角约为 6° ,而探测光基本不受影响,其透过率分别为 96.3% 和 99.2%。

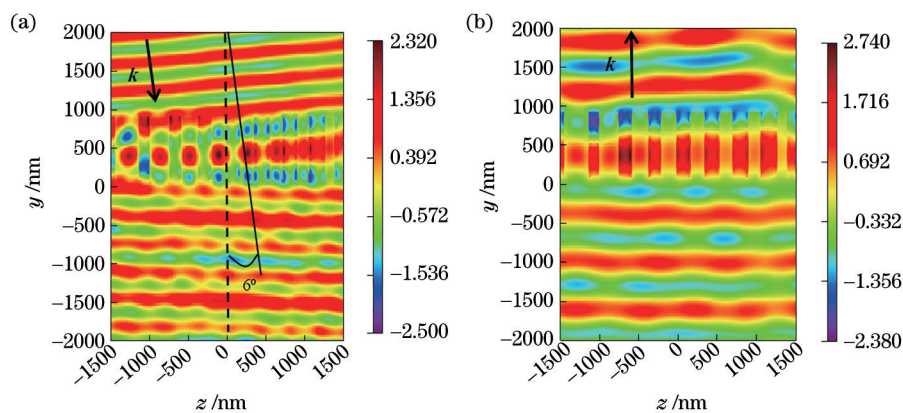


图 7 超表面结构引起的偏折角仿真结果。(a) 510 nm 耦合光; (b) 852 nm 探测光

Fig. 7 Simulation results of abnormal deflection angle caused by metasurface structure. (a) 510 nm coupling laser; (b) 852 nm probe laser

4 结 论

针对原子传感器中光学元器件分立、光利用率

不高的问题,以双光子激发铯里德堡原子为例,基于广义斯涅耳定律和等效介质理论,在原子气室玻璃上设计了一种光学超表面结构,实现 510 nm 耦合

光和 852 nm 探测光的光束分离和高效透过,其中对 510 nm 耦合光偏折角约为 6° ,对 852 nm 探测光基本不偏折,两束激光的透过率均在 96.3% 以上。研究表明,在原子气室玻壳上进行光学超表面结构设计,可实现原子传感器的整体光路集成,提升原子传感器的集成度和便携性,可作为原子传感器进一步小型化的有效途径之一。

参 考 文 献

- [1] 李新坤, 蔡玉珍, 郑建朋, 等. 碱金属原子气室研究进展[J]. 导航与控制, 2020, 19(1): 125-132.
Li X K, Cai Y Z, Zheng J P, et al. Research progress on the alkali metal atomic vapor cell[J]. Navigation and Control, 2020, 19(1): 125-132.
- [2] 李兴辉, 杜婷, 韩攀阳, 等. 微型碱金属原子气室 MEMS 制作技术[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(3): 1-4.
Li X H, Du T, Han P Y, et al. MEMS fabrication technology for miniature alkali metal atom vapor cells [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(3): 1-4.
- [3] Rohrbaugh S, Wang H T J, Singh J, et al. Magnetic decoupling of ^{129}Xe nuclear spin relaxation due to wall collisions with RbH and RbD coatings[J]. Physical Review A, 2012, 86(4): 043413.
- [4] Anger B C, Schrank G, Schoeck A, et al. Gas-phase spin relaxation of ^{129}Xe [J]. Physical Review A, 2008, 78(4): 043406.
- [5] Meyer D, Larsen M. Nuclear magnetic resonance gyro for inertial navigation[J]. Gyroscopy and Navigation, 2014, 5(2): 75-82.
- [6] Eklund E J, Shkel A M, Knappe S, et al. Glass-blown spherical microcells for chip-scale atomic devices [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 143(1): 175-180.
- [7] 汤跃, 任子明, 李云超, 等. 应用于芯片原子钟的微量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.
- [8] Li K, Guo Y H, Pu M B, et al. Dispersion controlling meta-lens at visible frequency[J]. Optics Express, 2017, 25(18): 21419-21427.
- [9] Yu N F, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces[J]. Nature Materials, 2014, 13(2): 139-150.
- [10] 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.
- [11] Luo X G. Principles of electromagnetic waves in metasurfaces[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2015, 58(9): 594201.
- [12] Voshchinnikov N V, Videen G, Henning T. Effective medium theories for irregular fluffy structures: aggregation of small particles[J]. Applied Optics, 2007, 46(19): 4065-4072.
- [13] Lalanne P. Effective medium theory applied to photonic crystals composed of cubic or square cylinders[J]. Applied Optics, 1996, 35(27): 5369-5380.
- [14] Xiao S S, Shen L F, He S L. A plane-wave expansion method based on the effective medium theory for calculating the band structure of a two-dimensional photonic crystal[J]. Physics Letters A, 2003, 313(1/2): 132-138.
- [15] 宋彤彤, 罗杰, 赖耘. 赝局域有效介质理论[J]. 物理学报, 2020, 69(15): 154203.
Song T T, Luo J, Lai Y. Pseudo-local effect medium theory[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(15): 154203.
- [16] Sedlacek J A, Schwettmann A, Kübler H, et al. Microwave electrometry with Rydberg atoms in a vapour cell using bright atomic resonances[J]. Nature Physics, 2012, 8(11): 819-824.
- [17] 张正源, 张天乙, 刘宗凯, 等. 里德堡原子多体相互作用的研究进展 [J]. 物理学报, 2020, 69(18): 180301.
Zhang Z Y, Zhang T Y, Liu Z K, et al. Research progress of Rydberg many-body interaction[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(18): 180301.
- [18] 周健, 张玮茜, 郝艳梅, 等. 铯蒸气池内微波场空间分布的高分辨测量[J]. 量子光学学报, 2016, 22(4): 311-315.
Zhou J, Zhang W Q, Hao Y M, et al. High spatial resolution measurement of the microwave electric field distribution in cesium atoms vapor cell[J]. Journal of Quantum Optics, 2016, 22(4): 311-315.
- [19] Simons M T, Haddab A H, Gordon J A, et al. A Rydberg atom-based mixer: measuring the phase of a radio frequency wave[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(11): 114101.
- [20] Jing M Y, Hu Y, Ma J, et al. Atomic superheterodyne receiver based on microwave-

- dressed Rydberg spectroscopy[J]. *Nature Physics*, 2020, 16(9): 911-915.
- [21] 陈磊, 严金华, 郭焕祥, 等. 基于硅基超表面的高效率大角度光束偏转[J]. *光学学报*, 2021, 41(3): 0305001.
Chen L, Yan J H, Guo H X, et al. Highly efficient large-angle beam deflection based on silicon-based metasurface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 0305001.
- [22] 张梦蝶, 王文涛, 孙朋, 等. 一种基于纳米环-柱结构的高效非线性超表面[J]. *光学学报*, 2021, 41(12): 1219002.
Zhang M D, Wang W T, Sun P, et al. A highly efficient nonlinear metasurface based on nanoring-rod structures[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1219002.
- [23] 杨渤, 程化, 陈树琪, 等. 基于傅里叶分析的超表面多维光场调控[J]. *光学学报*, 2019, 39(1): 0126005.
Yang B, Cheng H, Chen S Q, et al. Multi-dimensional manipulation of optical field by metasurfaces based on Fourier analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0126005.
- [24] Schmidt D, Schubert M. Anisotropic Bruggeman effective medium approaches for slanted columnar thin films[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(8): 083510.
- [25] Benali M A, Derraz H T, Ameri I, et al. Synthesis and analysis of SnO₂/ZnO nanocomposites: structural studies and optical investigations with Maxwell-Garnett model[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, 240: 122254.
- [26] 张军, 韩胜元, 卢贵武, 等. 铌酸锂晶体电子结构和光学性质计算[J]. *中国激光*, 2007, 34(9): 1227-1231.
Zhang J, Han S Y, Lu G W, et al. Calculation for electronic structure and optical properties of LiNbO₃ crystals[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(9): 1227-1231.
- [27] 李佳群, 闫剑锋, 李欣, 等. 透明介质材料的超快激光微纳加工研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 48(2): 0202019.
Li J Q, Yan J F, Li X, et al. Research advancement on ultrafast laser microprocessing of transparent dielectrics[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(2): 0202019.