

基于广义斯涅尔定律对超构表面原理的研究

肖国梁 孙立坤 肖竹 谢佳伶 洪许海

(辽宁师范大学物理与电子技术学院, 辽宁 大连 116029)

摘要 作为超构材料的二维表现,超构表面是由亚波长尺度的原子结构组成的,利用单层或多层结构可以实现对入射电磁波的相位、传播方向及物理作用机制的调节。本文采用广义斯涅尔定律描述界面处引入的相位突变对电磁波折射特性的影响,并结合等离子体基模波导理论和庞加莱球模型研究了超构表面相位的传输机制。同时,本文以金-二氧化硅-金波导和平面超构透镜为例,分别介绍了传输相位和几何相位的应用,并对传输相位和几何相位在应用中遇到的困难提出一些解决办法。

关键词 传输相位;几何相位;超构表面;超构透镜

STUDY OF PRINCIPLE OF METASURFACE BASED ON THE GENERALIZED SNELL'S LAW

XIAO Guoliang SUN Likun XIAO Zhu XIE Jialing HONG Xuhai

(School of Physics and Electronic Technology, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029)

Abstract As two-dimensional performance of metamaterials, the metasurface is made up of atomic structures on the subwavelength scale, and the phase, propagation direction and physical mechanism of the incident electromagnetic wave can be modulated by using a single or multilayer structure. In this paper, the generalized Snell's law is used to describe the influence of phase variation introduced at the interface on the refraction characteristics of electromagnetic waves, and the propagation mechanism of metasurface phase is studied by combining the plasma fundamental mode waveguide theory and the Poincaré sphere model. Meanwhile, taking gold-silicon dioxide-gold waveguide and planar meta-lenses as examples, the applications of transmission phase and geometric phase are introduced respectively, and some solutions are proposed for the difficulties encountered in the applications of transmission phase and geometric phase.

Key words transmission phase; geometric phase; metasurface; meta-lenses

关于超构材料的历史最早可以追溯到 1968 年左手材料概念的提出。直到 1999 年,英国科学家 J. Pendry 提出了金属开口环结构(可以说是最

早的超构材料结构单元),并利用了磁共振的原理从真正意义上实现了负磁导率(在 1996 年就已经提出了负介电常数的概念)^[1]。不同于右手材料

收稿日期: 2024-05-26

基金项目: 2021 年辽宁省普通高等教育本科教学改革研究优质教学资源建设与共享项目“跨校修读学分课程建设的研究与实践——以物理专业《光学》课程为例”。

通信作者: 洪许海,辽宁师范大学物理与电子技术学院讲师, hongxuhai@163.com。

引文格式: 肖国梁,孙立坤,肖竹,等. 基于广义斯涅尔定律对超构表面原理的研究[J]. 物理与工程, 2024, 34(6): 131-135.

Cite this article: XIAO G L, SUN L K, XIAO Z, et al. Study of principle of metasurface based on the generalized Snell's law[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(6): 131-135. (in Chinese)

遵循的右手定则,左手材料具有磁导率和介电常数同时为负数的特性,凭借这一强大特性,左手材料已经广泛应用于天线、激光和完美透镜(与下文中的超构透镜相联系)等领域。起初,人们对于超构材料的构想仅仅停留在均匀介质当中,但如今已经可以通过各种变换手段实现对不均匀介质(异质表面)中电磁波的调控,并且随着科技水平的不断提高,超构材料的应用领域也在不断扩大^[2,3]。目前,超构材料已经在超分辨率成像和光刻、电磁隐身和电磁幻象等领域表现出巨大的应用价值^[3,4]。然而,体超构材料的三维加工和金属损耗问题(尤其在光波段)严重限制了其应用的进一步拓展,并且应用于高频波段下的超构材料难以制作且不稳定,此外,常见的金属会对电磁波产生强烈的吸收,这都使得基于体超构材料的相关器件难以加工。如果能够将三维超构材料压缩到二维超构表面,则有望解决以上问题。基于该思想,近年来形成了新兴的研究领域——超构表面。作为超构材料的二维表现,超构表面的核心在于人工亚波长大小的原子周期性排列,并且打破了传统斯涅尔定律对空间平移不变性的依赖。超构表面的原理是依靠电磁波在具有周期结构表面上的相位突变(而非相位累积),并且利用单层或少层的人造周期结构对散射场进行调控。超构表面突破了传统三维材料的限制,主要应用于微纳米光学领域的研究,例如,超构透镜、全息、信息加密、生物传感、红外热成像等^[4]。

本文主要介绍超构表面的工作原理——广义斯涅尔定律,以金属-绝缘体-金属波导为例进行具体说明,并针对超构表面的缺点提出了一些解决方案。

1 相位调控机制

异质超构表面的主要特点是每个原子都能产生特定的电磁相位,因此在电磁波的调控方面具有上限高、机制灵活等优点。近年来,基于亚波长尺度的原子结构的电磁调控技术具有设计灵活、调控范围广(相位、振幅、偏振度等)、制作成本低等特点,逐渐进入人们的视野当中,并发展出了微波纳米材料、表面等离子激元、超构材料学等多个前沿领域。接下来将阐述超构表面相位调控的两种

机制。

1.1 传输相位调控机制

在简单的电磁波传输过程中,相位与光程存在线性关系。基于这一理念自然而然地产生了传输相位调控理念^[5]。

一束线偏振波可以分解成两个等幅的左、右旋圆偏振波,当该束线偏振波由各向同性的介质进入各向异性的介质后,由于左、右旋波在各向异性的介质中的传播速度略有不同,在经过各向异性介质时产生不同的相位滞后,线偏振波的偏振面将以速度方向为轴不断地旋转。在进入各向异性介质之前,在真空中沿 z 方向传播的线偏振电磁波描述如下

$$E_0 e^{i(k_0 z - \omega t)} \mathbf{e}_x = \frac{1}{\sqrt{2}} E_0 (\mathbf{e}_R + \mathbf{e}_L) e^{i(k_0 z - \omega t)} \quad (1)$$

其中, \mathbf{e}_R 和 \mathbf{e}_L 分别表示左、右旋波电矢量振动方向的单位矢量。在进入各向异性介质之后,假设旋光体系对左、右旋光的透射率相等,则电磁波变为

$$E_0 \left[\cos(\Delta k \cdot \frac{z}{2}) \mathbf{e}_x + \sin(\Delta k \cdot \frac{z}{2}) \mathbf{e}_y \right] e^{i(\bar{k}z - \omega t)} \quad (2)$$

其中, $\Delta k = k_+ - k_-$, $\bar{k} = \frac{k_+ + k_-}{2}$ 。假设各向异性介质的厚度为 d ,则从各向异性介质出射的波的偏振状态仍是线偏振波^[5],偏振方向为

$$\mathbf{E} \parallel \left[\cos(\Delta k \cdot \frac{z}{2}) \mathbf{e}_x + \sin(\Delta k \cdot \frac{z}{2}) \mathbf{e}_y \right] \quad (3)$$

与入射波比较,偏振方向旋转了如下角度(将 $z=d$ 代入)

$$\Delta\alpha = \Delta k \cdot \frac{d}{2} \quad (4)$$

此即著名的法拉第旋光效应,显然这个偏振转角正比于旋光介质的厚度 d 。

由此,可以将其拓展到一般的均匀介质,设此均匀介质的折射率为 n ,那么有

$$\Delta\alpha = nk_0 d \quad (5)$$

其中, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为自由空间中的波矢。

目前,制造传输相位调控的光学元件面临两个关键性问题:一个是大多数器件不是规则的几何形状,不利于集成和共形;另一个是为了产生较为明显的旋转角度需要较厚的介质,在一定程度

上增加了制造的成本。目前,构建传输相位调控的常用方法分为两类:一类为基于等离子体基模波导理论^[6];另一类为广义斯涅尔定律。这两种方法的区别在于对折射率的调控方式不同。

1.1.1 等离子体基模波导理论

等离子体波导理论主要是利用表面等离子体波导中传播物理量随波导几何参数(如绝缘体介质厚度)变化的关系对电磁场进行调控。采用波导的好处是可以将电磁波有效地集中于某一方向进行传输,从而解决平面波信号传输成本过高的问题^[6,7]。在波导内部传输的电磁场可由如下方程表示

$$\begin{cases} E_{0x} = \frac{i}{k_c^2} [k_0 \partial_y (cB_{0z}) + k_z \partial_x E_{0z}] \\ E_{0y} = -\frac{i}{k_c^2} [k_0 \partial_y (cB_{0z}) - k_z \partial_x E_{0z}] \\ cB_{0x} = -\frac{i}{k_c^2} [k_0 \partial_y E_{0z} - k_z \partial_x (cB_{0z})] \\ cB_{0y} = \frac{i}{k_c^2} [k_0 \partial_y E_{0z} + k_z \partial_x (cB_{0z})] \end{cases} \quad (6)$$

此外,该场方程还需要满足如下的边界条件

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \mathbf{n} \cdot \mathbf{D} = \sigma \\ \mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0 \\ \mathbf{n} \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \end{cases} \quad (7)$$

显然,式(6)中的6个场分量只有2个是独立变量,一旦场的纵向分量 E_{0z} 和 B_{0z} 已知,则可以通过计算得到其他场分量。另外,值得注意的是,公式中的 E_{0y} 和 B_{0x} 有着很好的对称性。

目前,等离子体基模波导最常用的结构是金属-绝缘体-金属波导。该结构中的金属层和绝缘体层均为周期排列的纳米结构,因此不同频率的电磁波在通过这些纳米结构时产生不同的相位。

基模的色散方程可表示为

$$\tanh\left(\frac{d\sqrt{h_{sp}^2 - k_0^2 \epsilon_d}}{2}\right) = \frac{-\epsilon_d \sqrt{h_{sp}^2 - k_0^2 \epsilon_m}}{\epsilon_m \sqrt{h_{sp}^2 - k_0^2 \epsilon_d}} \quad (8)$$

其中, k_0 是电磁波在自由空间中的波矢, ϵ_m 和 ϵ_d 分别是金属和绝缘体介质的介电常数, d 是绝缘体介质的厚度, h_{sp} 为等离子体表面的传播常数。由式(8)可知,基模的色散关系与绝缘体介质的厚度密切相关,因此可利用绝缘体介质的厚度调控等离子体表面的物理性质,进而调控相位差。将

金属与不同厚度的绝缘体介质按一定顺序排列可实现特定的相位梯度^[7,8]。

1.1.2 广义斯涅尔定律

对于异质超构表面,影响电磁响应特性的自变量只有2个,而对于这样一个各向异性的介质表面,传统的斯涅尔定律不再适用,需要将其推广至广义斯涅尔定律来解决上述问题。广义斯涅尔定律可以用来描述界面处引入的相位突变对电磁波折射特性的影响。

电磁波在各向同性分界面上传播时,如图1(a)所示,有下式成立

$$n_1 \sin\theta_i = n_2 \sin\theta_t \quad (9)$$

此即传统的斯涅尔定律。

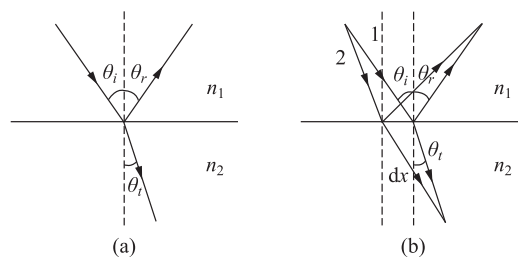


图1 电磁波在两种介质分界面上发生折射和反射的示意图 (a) 各向同性介质分界面; (b) 各向异性介质分界面

电磁波在各向异性分界面上传播时,如图1(b)所示,两束电磁波的传播情况为:①产生 φ 相位的反射和折射;②产生 $\varphi + d\varphi$ 相位的反射和折射。

两束反射线的相位差应为0,于是有

$$[k_0 n_1 \sin\theta_i dx + (\varphi + d\varphi)] - [k_0 n_1 \sin\theta_r dx + \varphi] = 0 \quad (10)$$

两条折射线的相位差也应为0,于是有

$$[k_0 n_1 \sin\theta_i dx + (\varphi + d\varphi)] - [k_0 n_2 \sin\theta_t dx + \varphi] = 0 \quad (11)$$

由式(10)和式(11)可得

$$\begin{cases} \sin\theta_r - \sin\theta_i = \frac{\lambda}{2\pi n_1} \frac{d\varphi}{dx} \\ n_2 \sin\theta_t - n_1 \sin\theta_i = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{d\varphi}{dx} \end{cases} \quad (12)$$

此即广义斯涅尔定律。

1.1.3 传输相位的应用

以金-二氧化硅-金波导为例,这种结构的优越性在于:通过三层均匀介质的几何参数可以有效地调控电磁波的吸收和反射率^[8]。金-二氧化硅-金波导结构由超材料和基底两部分组成,其

中超材料结构体的组成部分从下至上依次为金薄膜、二氧化硅薄膜、金薄膜。基底选用二氧化硅材料,为了防止其与超材料结构发生相互作用。金-二氧化硅-金波导示意图如图 2 所示。

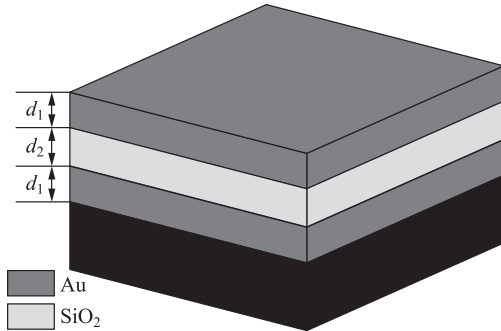


图 2 金-二氧化硅-金波导示意图

金-二氧化硅-金波导结构的中间物质为原子晶体,结构与金刚石类似,晶体结构为正四面体,这种特殊的微观几何性质使其能够在纳米尺度上进一步调控电磁波的物理性质^[8]。但基于这种结构制造的光学元器件存在色差问题,一种解决途径是采用波导材料色散和结构色散相互补偿的方法,另一种解决途径是利用非阿贝尔和非线性效应相结合的方法,对金-二氧化硅-金波导结构的光学元器件进行改进,以达到更好的工作性能。

1.2 几何相位调控机制及其应用

1984 年,英国物理学家 M. Berry 提出了 Berry 相位的概念,并利用庞加莱球对几何相位调控机制进行了分析^[9]。目前,几何相位调控机制仍处于科研前沿领域。

其中, $\frac{1}{2} [T_x \exp(i\varphi_x) - T_y \exp(i\varphi_y)] \sin 2\theta$ 可改写为 $[T_x \exp(i\varphi_x) - T_y \exp(i\varphi_y)] \sin\theta \cos\theta$, 该分量被称为正交偏振电磁分量。

对于圆偏振入射光,琼斯矩阵表示为

$$J_c = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left\{ [T_x \exp(i\varphi_x) + T_y \exp(i\varphi_y)] \begin{pmatrix} 1 \\ i\sigma \end{pmatrix} + [T_x \exp(i\varphi_x) - T_y \exp(i\varphi_y)] \exp(i2\sigma\theta) \begin{pmatrix} 1 \\ -i\sigma \end{pmatrix} \right\} \quad (15)$$

其中, $\sigma = \pm 1$, 分别对应于右旋圆偏振光和左旋圆

Berry 相位的概念如下:当一个绝热孤立系统从初态沿着某一路径演化并回到初态时,除熵增原理的影响之外,系统的末态的波形与初态相比发生变化,但这在经典物理学中是无法解释的, M. Berry 教授创新性地利用量子力学方法对波形变化量度增加一个额外的相位因子,合理地解释了上述现象。与经典波的相位不同的是,这种相位仅仅与孤立系统演化的路径几何尺度有关,因此该相位被称为几何相位。采用庞加莱球^[9]描述几何相位的示意图如图 3 所示。

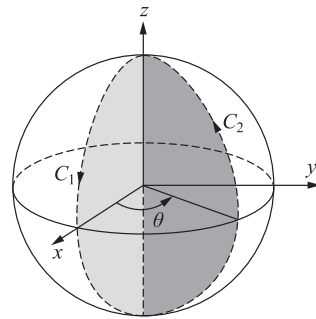


图 3 庞加莱球示意图

这种几何相位的产生可表示为琼斯矩阵

$$J_\theta = \begin{pmatrix} T_x \exp(i\varphi_x) & 0 \\ 0 & T_y \exp(i\varphi_y) \end{pmatrix} \quad (13)$$

其中, φ_x 和 φ_y 分别为异质超构原子对 x 和 y 方向偏振光引入的偏振相位, T_x 和 T_y 分别为异质超构原子对 x 和 y 方向偏振光的透射系数。将式(13)描述的异质超构原子绕 z 方向逆时针旋转角度 θ , 则新的琼斯矩阵可写为

$$J_\theta = \begin{pmatrix} T_x \exp(i\varphi_x) \cos^2\theta + T_y \exp(i\varphi_y) \sin^2\theta & \frac{1}{2} [T_x \exp(i\varphi_x) - T_y \exp(i\varphi_y)] \sin 2\theta \\ \frac{1}{2} [T_x \exp(i\varphi_x) - T_y \exp(i\varphi_y)] \sin 2\theta & T_x \exp(i\varphi_x) \sin^2\theta + T_y \exp(i\varphi_y) \cos^2\theta \end{pmatrix} \quad (14)$$

偏振光。

如何基于超构表面制造更大几何尺寸的光学元器件是目前科研领域仍需解决的问题。针对这个问题,可以利用逆向设计方法对元器件进行改进^[9]。基于以上理论推导,人们意识到了几何相位的应用需要依赖路径几何尺度的改变,据此,科学家制造了包括平面成像透镜在内的简单相位分布的平面光学器件,还实现了诸如超振荡透镜、超构透镜、全息器件等一系列相位分布复杂的光学器件^[10]。本文以平面超构透镜为例进行简要介绍。

几何相位的本质在于路径的变化产生了附加

相位差,路径改变可以表述为光程差的改变,而对于超构表面中应用广泛的基础单元是异质表面,由此,早在2011年,哈佛大学的F. Capasso教授团队提出了平面超构透镜是按照奇异的折射(反射)规律成像的,并给出了相应的数学表达式。但是在2017年,墨尔本大学的T. Davis教授指出,F. Capasso教授团队提出的物理机制是不完备的。

F. Capasso教授团队发现入射电磁波在通过平面超构透镜与空间介质的界面时发生了相位的突变,并且该相位变化是不连续的,该结论与传统波动光学中的费马定理是不相容的。因此,人们需要推导出基于异质表面的广义光学定律,这样广义斯涅尔定律应运而生。在基于广义的奇异折射(反射)定律下,人们可以设计出功能性强、应用更广泛的平面超构透镜。

由式(12)可知,通过相位梯度 $\frac{d\varphi}{dx}$ 可以获得任意方向上的折射束,而且在相位梯度恒定的情况下,折射光束角度的偏转仅仅与入射角度有关系,因此其全反射临界角将出现两个可能值

$$\theta_c = \arcsin\left(\pm \frac{n_2}{n_1} - \frac{\lambda}{2\pi n_1} \frac{d\varphi}{dx}\right) \quad (16)$$

由于平面超构透镜的组成单元为亚波长周期结构,基于庞加莱球的物理机制可知,入射的球面波的相位可以根据通过的几何路径来调控。假设超构透镜的焦点坐标为 (a, b, c) ,入射波的坐标为 (x, y, z) ,波长为 λ ,由式(14)和式(15)可知,平面超构透镜的相位函数可表示为

$$\Phi = -\frac{2\pi n_2}{\lambda n_1} \cdot \left(\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2} - c\right) \quad (17)$$

据此,可知平面超构透镜旋转角度 θ 为 $\frac{\Phi}{2}$ 。

2 结语

超构表面的组成单元为周期性亚波长原子,与传统的光学元器件和超构体材料相比,具有灵活调控入射电磁波物理性质的特点。本文介绍了入射电磁波在超构表面中的两种传输机制,并基于广义斯涅尔定律和庞加莱球模型研究了传输机制的原理和应用。最后,对超构表面在科研领域遇到的困难,如色差、器件设计尺寸以及能量损耗的问题提供了一些解决方法。

参 考 文 献

- [1] 陈龙. 基于超构表面的消色差超衍射透镜研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
CHEN L. Investigation of achromatic sub-diffraction lens based on metasurface[D]. Changsha: Hunan University, 2021. (in Chinese)
- [2] 刘冰意. 声学/光学梯度超构表面的负反射和负折射特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
LIU B Y. Study on the negative reflection and refraction of acoustic/optical gradient metasurface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [3] 陈绩, 叶欣, 吴悦, 等. 中国光学十大进展: 基于超构透镜阵列的新型成像器件[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(22): 2200001.
CHEN J, YE X, WU Y, et al. China's top 10 optical breakthroughs: research of optical imaging devices based on metalens array [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(22): 2200001. (in Chinese)
- [4] 付博妍, 毕千惠, 郑诗雨, 等. 基于多维光场调控的超构表面先进成像与显示研究[J]. 光学学报, 2024, 44(14): 1400001.
FU B Y, BI Q H, ZHENG S Y, et al. Advanced metasurface imaging and display based on multidimensional light field manipulation[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(14): 1400001. (in Chinese)
- [5] 徐孝浩, 高文禹, 李添悦, 等. 超构表面赋能光学微操控[J]. 光学学报, 2024, 44(5): 0500001.
XU X H, GAO W Y, LI T Y, et al. Metasurfaces-empowered optical micro-manipulation [J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(5): 0500001. (in Chinese)
- [6] 马耀光, 高宇斌. 超构表面: 设计原理与应用挑战[J]. 中国激光, 2024, 51(1): 0103001.
MA Y G, GAO Y B. Metasurfaces: design principles and application challenges[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(1): 0103001. (in Chinese)
- [7] 刘会刚, 张翔宇, 南雪莹, 等. 基于准连续域束缚态的全介质超构表面双参数传感器[J]. 物理学报, 2024, 73(4): 047802.
LIU H G, ZHANG X Y, NAN X Y, et al. All-dielectric metasurface two-parameter sensor based on quasi-bound states in continuum[J]. Acta Physica Sinica, 2024 73(4): 047802. (in Chinese)
- [8] LI X, HU C J, TIAN Y, et al. Maximum helical dichroism enabled by an exceptional point in non-Hermitian gradient metasurfaces[J]. Science Bulletin, 2023, 68(21): 2555-2563.
- [9] 姚俊娜. 高阶庞加莱球光束的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
YAO J N. Research on the high-order poincaré sphere beams [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023. (in Chinese)
- [10] 孙汝生, 刘通, 任元, 等. 基于涡旋半波片制备多种混合阶庞加莱球光束[J]. 光学学报, 2022, 42(22): 2226001.
SUN R S, LIU T, REN Y, et al. Generation of various hybrid-order poincaré sphere beams based on vortex half-wave plates [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(22): 2226001. (in Chinese)