

斯涅尔定律及其推广和应用^{*}

凌晓辉 王友文 戴志平

(衡阳师范学院物理与电子工程学院 湖南 衡阳 421002)

(收稿日期:2020-03-31)

摘要:从光学和电磁学中经典的反射和折射定律(斯涅尔定律)出发,通过假设折射率为负、在界面人为地加横向相位梯度、非平面波(比如光束)入射等启发性提问,引入斯涅尔定律的几项重要拓展和推广,介绍斯涅尔定律在负折射效应、超构材料、超构表面及光的自旋霍尔效应等前沿领域的应用.

关键词:斯涅尔定律 超构材料 超构表面 光的自旋霍尔效应

反射和折射定律是光学和电磁学课程的基本知识点,描述了光波(电磁波)在界面反射和折射时所遵循的基本法则,由荷兰科学家斯涅尔(Snell, 1580—1626)首次提出,并因此而得名.斯涅尔定律的基本内容^[1]:入射、反射和折射光线位于同一面内,入射角等于反射角(反射定律可以看成是斯涅尔定律的一个特例),且折射角与入射角满足如下关系

$$n_2 \sin t = n_1 \sin i \quad (1)$$

这里 n_1 和 n_2 为界面两侧媒质的折射率, i 和 t 分别为入射角和折射角.这一定律是物理学中的经典定律,适合于电磁波、声波等.

斯涅尔定律看似简单,实则博大精深,蕴含了能量守恒、动量守恒和角动量守恒等基本物理规律.然而,实际上斯涅尔定律一直都在发展,新的科学发现不断赋予它新的内涵和外延.近年来,斯涅尔定律被科学家们极大地拓展,产生了许多新的研究前沿,如负折射^[2]、超构材料^[3,4]、超构表面^[5~7]和光的自旋霍尔效应^[8~12].本文将在介绍经典斯涅尔定律的基础上,引入斯涅尔定律的几项重要拓展,讨论其在上述前沿领域的推广和应用.

1 假设折射率为负数 斯涅尔定律会导致什么现象?

当折射媒质的折射率为负数时,会发生什么现

象?此时斯涅尔定律是否仍然适用?经典的斯涅尔定律显示,当界面两边媒质的折射率均为正数时,折射光线与入射光线居于法线的两侧,即正折射.然而,当出射媒质的折射率为负值时,折射光线将与入射光线居于法线的同侧,这种异常折射被称为负折射(图1).这一结论可由式(1)直接得出,即当 $n_2 < 0$ 时,折射角 t 也必然为负,也就是说,入射光线与折射光线位于法线的同侧.

负折射由前苏联科学家 Veselago 在 1968 年首次提出^[2],然而他的论文发表后一直没有受到人们太多的关注.因为负折射率材料要求材料的介电常数和磁导率同时为负值,但迄今为止,自然界中没有找到这样的材料.那能否人工合成负折射率材料呢?2000年,美国加州大学 Smith 等人首次设计出微波段的人工等效负折射率材料,并在实验上验证了负折射现象^[3].负折射率材料具有许多新颖的物理性质,如平板成像、超透镜、反常多普勒效应、逆切伦科夫辐射等,因此被称为超构材料^[4].超构材料是近 20 年来的研究热点,引起了光电子学、电磁学、材料物理、凝聚态物理、微波、天线等学科革命性的变化和发展,在信息、能源、国防等领域具有重要的应用前景.它被美国 Science 杂志列为 21 世纪前 10 年的十大重要科学进展之一,更被美国国防部列为六

^{*} 国家自然科学基金,项目编号:11604087

作者简介:凌晓辉(1983—),男,博士,副教授,硕士生导师,研究方向包括光的自旋-轨道相互作用、光的自旋霍尔效应、结构光场的传输与调控等.

大颠覆性技术之一。

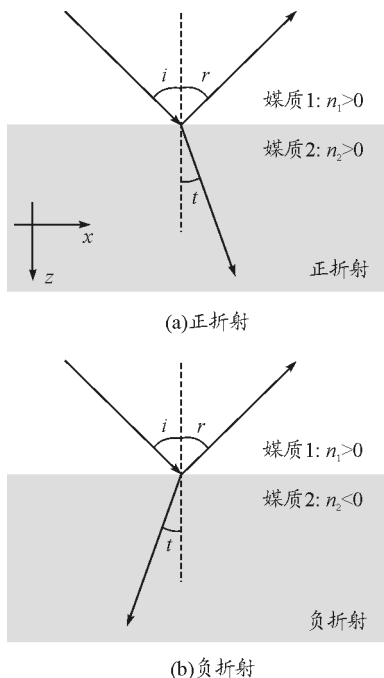


图 1 光在两种媒质界面的反射和折射

2 在界面上加一个横向相位梯度会发生什么现象?

从动量守恒的角度看,入射光、反射光和折射光在平行于界面方向的波矢分量应当相等,即

$$k_1 \sin i = k_1 \sin r = k_2 \sin t \quad (2)$$

这里 $k_{1,2} = n_{1,2} k_0$, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$, 其中 λ 为光的波长. 从这一点出发,两边同时约去 k_0 ,可以直接推导出斯涅尔定律,即式(1).

试想,如果人为地在界面上加一个横向的相位梯度(即加一个横向的波矢分量 k_x),将会发生什么现象? 斯涅尔定律要做什么样的修正? 此时式(2)变为

$$k_1 \sin i + k_x = k_1 \sin r = k_2 \sin t \quad (3)$$

这里 $k_x = \nabla\Phi_x$, 且 Φ_x 为沿 x 方向的线性梯度相位,因此 k_x 为常数. 此时反射角和折射角都将得到修正,式(3)也被称为广义斯涅尔定律^[5]. 很容易由该定律得知,光垂直入射时(入射角为零),反射和折射角将不再为零. 以反射为例,如图 2 所示,当入射光垂直入射时,随着相位梯度逐渐增大,反射角 $r =$

$\arcsin\left(\frac{k_x}{k_0}\right)$ 也将逐渐增大. 当相位梯度满足 $k_x > k_0$ 时,光束将不再反射,而是变为沿着界面传播的表面波^[6,7]. 现在的问题是,如何实现这种线性的相位梯度?

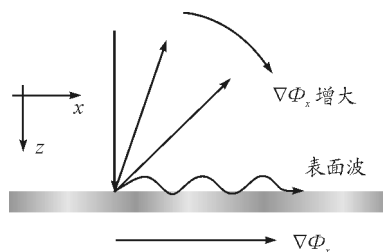


图 2 广义斯涅尔定律. 横向的相位梯度使光产生异常反射(或折射),甚至变成表面波

美国哈佛大学 Capasso 教授等人在 2011 年率先提出广义斯涅尔定律^[5],并用等离子超构表面在实验上实现了界面的线性相位梯度. 这种超构表面由亚波长的“超原子”构成,每个“超原子”结构参数不同,按一定规则排列,使反射和折射光波产生不同的相位响应,从而可实现线性的相位梯度. 超构表面的厚度远远小于波长,因此可以看成是二维的超构材料,能够在波长和亚波长尺度有效地调控光波的偏振、相位、振幅、波前等性质,在光学、纳米光子学、等离子光学等领域具有重要应用前景.

3 非平面波入射时 斯涅尔定律又将如何起作用?

理想光线和平面波严格遵循斯涅尔定律,入射、反射和折射光线处于同一个平面之内. 而对于实际光束或波包,由角谱理论可知^[1],可以看成是由许多具有稍微不同的传播方向的平面波相干叠加而成,它的反射和折射行为又将如何? 此时,反射(折射)光束是由不同入射角平面波的反射(折射)的叠加,它将表现为光束发生垂直于入射面的、自旋相关的横向位移,即光的自旋霍尔效应,如图 3 所示^[8~12].

光的自旋霍尔效应为操控光的自旋和轨道角动量提供了前所未有的手段,在精密计量、信息处理以及自旋霍尔光子器件等方面具有重要的应用潜力^[9,12,13]. 从角动量守恒的角度看,由于界面具有旋

转不变性, z 方向的角动量应该守恒. 光束发生反射和折射时, 自旋角动量发生改变, 因为光的自旋角动量的方向与光的传播方向平行. 由于 z 方向的总的角动量守恒, 因此自旋角动量的变化量会转化为轨道角动量, 这种轨道角动量体现为横向的自旋霍尔位移^[13]. 然而这种自旋-轨道耦合效应非常微弱, 其导致的横向位移也非常微小, 一般处于亚波长量级(波长的数十分之一). 因此长期以来, 这一效应并未被人们所观察到. 2008年, 美国科学家引入量子弱测量技术, 将自旋霍尔位移放大数千倍, 从而首次在实验上观测到了光的自旋霍尔效应^[9]. 之后, 这一领域得到了越来越多研究者的关注. 近年来, 随着纳米光子学、近场光学、等离子光学、拓扑光子学等领域的迅速发展, 亚波长尺度的光子自旋霍尔效应变得越来越重要, 因为这些领域本身研究的就是波长和亚波长尺度的效应^[12,13].

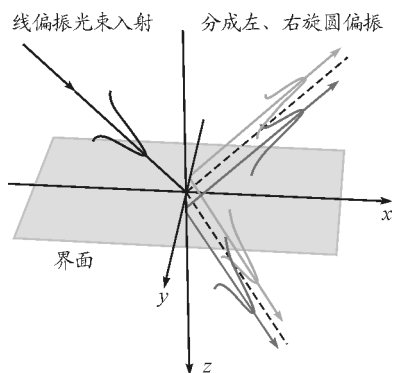


图3 光的自旋霍尔效应. 线偏振高斯光束入射到界面时, 其左、右旋圆偏振分量产生垂直于入射面的、微小的横向位移

值得一提的是, 在全反射的情况下, 反射光束除了产生横向的自旋霍尔位移, 还会发生位于入射面内的、侧向的古斯-汉森(Goos-Hänchen)位移, 大小一般也在波长量级. 1947年, 古斯-汉森位移首次在实验上被观察到, 已为人们所熟知, 相关内容见诸于各种光学教科书^[1]. 其产生的机制与光的自旋霍尔效应虽有不同, 但本质上都可以认为是由于光束中各平面波分量具有不同的入射角而造成的, 两种效应可以在理论上被统一地描述起来^[14].

4 结论

斯涅尔定律是一个经典的物理定律, 具有丰富

的内涵和外延, 虽然在几百年前已被发现, 但仍在不断地迸发新的生命力. 本文简要介绍了近年来斯涅尔定律在负折射、超构材料或表面、光的自旋霍尔效应等科学前沿的推广和应用. 在斯涅尔定律的实际教学过程中, 可以通过文中所讨论的几个启发性的提问, 将其与最新的科学研究前沿联系起来, 促使学生积极思考、发现问题, 从而开拓学生的视野, 激发学生的想象力和学习物理的兴趣, 以达到事半功倍的教学效果.

参考文献

- 1 梁铨廷. 物理光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 19
- 2 Veselago V G. Electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968(10): 509 ~ 514
- 3 Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity [J]. Physical Review Letters, 2000, 84(18): 4 184 ~ 4 187
- 4 Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K. Metamaterials and negative refractive index [J]. Science, 2004, 305(5 685): 788 ~ 792
- 5 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(6 054): 333 ~ 337
- 6 Sun S L, He Q, Xiao S Y, et al. Gradient-index metasurfaces as a bridge linking propagating waves and surface waves [J]. Nature Materials, 2012, 11(5): 426 ~ 431
- 7 孙树林, 何琼, 肖诗逸, 等. 梯度特异介质表面研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080 009
- 8 Onoda M, Murakami S, Nagaosa N. Hall effect of light [J]. Physical Review Letters, 2004, 93(8): 083 901
- 9 Hosten O, Kwiat P. Observation of the spin Hall effect of light via weak measurements [J]. Science, 2008, 319 (5 864): 787 ~ 790
- 10 罗海陆, 文双春. 光自旋霍尔效应及其研究进展 [J]. 物理, 2012, 41(6): 367 ~ 373
- 11 秦毅, 李焱, 肖云峰, 等. 光自旋霍尔效应及面内光自旋分离 [J]. 物理, 2012, 41(6): 374 ~ 381

- 12 Ling X H, Zhou X X, Huang K, et al. Recent advances in the spin Halleffect of light [J]. Reports on Progress in Physics, 2017, 80(6): 066401
- 13 Bliokh K Y, Rodríguez - Fortuño F J, Nori F, et al. Spin - orbit interactions of light [J]. Nature Photonics, 2015, 9(12): 796 ~ 808
- 14 Bliokh K Y, Aiello A, Goos - Hänchen and Imbert - Fedorov beam shifts: an overview [J]. Journal of Optics, 2013, 15(1): 014 001

The Extensions and Applications of Snell's Law

Ling Xiaohui Wang Youwen Dai Zhiping

(College of Physics and Electronic Engineering, Hengyang Normal University, Hengyang, Hunan 421002)

Abstract: Based on the classical Snell's law in optics and electromagnetics, this paper introduces several important extensions and generalizations of Snell's law in the fields of negative refraction, metamaterial, metasurface, and spin Hall effect of light, through some enlightening questions such as assuming negative refractive index, artificially applying a transverse phase gradient at the interface, and non - plane wave illuminations.

Key words: Snell's law; metamaterials; metasurface; spin Hall effect of light

(上接第 124 页)

- 9 薛永红, 续佩君. 物理文化与物理教学[J]. 物理教师, 2004(11): 1 ~ 2, 17
- 10 Galilii. Teaching optics: A historico - philosophical perspective[M]. International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching. Springer, 2014: 97 ~ 128
- 11 Matthews MR. Science teaching: The role of history and philosophy of science[M]. London: Psychology Press, 1994
- 12 Pickering A. From science as knowledge to science as practice[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1992
- 13 Hacking I. Representing and Intervening; Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science [M]. Cambridge University Press, 1983
- 14 哈金. 表征与干预 [M]. 北京: 科学出版社, 2011
- 15 托尼·比彻, 保罗·特罗勒尔. 学术部落及其领地 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2008
- 16 周朝成. 当代大学中的跨学科研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2008
- 17 核心素养研究课题组. 中国学生发展核心素养 [J]. 中国教育学刊, 2016(10): 1 ~ 3
- 18 许国梁. 中学物理教学法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1993
- 19 Galilii, Hazan A. The influence of an historically oriented course on students' content knowledge in optics evaluated by means of facets - schemes analysis[J]. American Journal of Physics, 2000, 68(S1): S3 ~ S15
- 20 Levrini O, Bertozzi, Gagliardi M, et al. Meeting the Discipline - Culture Framework of Physics Knowledge: A Teaching Experience in Italian Secondary School[J]. Science & Education, 2014, 23(9): 1 701 ~ 1 731
- 21 Lehavı Y, Eylon B - S. Integrating Science Education Research and History and Philosophy of Science in Developing an Energy Curriculum [M]//MATTHEWS M R. History, Philosophy and Science Teaching: New Perspectives. Cham: Springer International Publishing, 2018. 235 ~ 260