

文章编号: 2095-4980(2016)06-0853-07

古斯汉欣位移研究进展

臧梦迪^{a,b,c}, 王婷婷^{a,b,c}, 张波^{a,b,c}, 沈京玲^{a,b,c*}

(首都师范大学 a.北京市太赫兹波谱与成像重点实验室;
b.太赫兹光电子学教育部重点实验室; c.物理系, 北京 100048)

摘要: 本文通过 K. Artmann 的稳定相位理论对古斯汉欣(Goos-Hänchen, GH)位移进行了定性解释和定量分析; 总结了国内外相关研究工作, 介绍了 GH 位移在金属界面、介质光栅结构、多层金属包络结构、光子晶体材料、手性材料等界面理论研究和实验测量结果; 综述了 GH 位移在不同波段特别是太赫兹波段的研究成果; GH 位移的测量方法有直接测量和干涉测量 2 种, 本文对此做了总结和解释; 最后, 以温度传感和浓度传感方面的研究成果为例介绍了 GH 位移的应用。

关键词: 古斯汉欣位移; 稳定相位法; 反射界面; 太赫兹波; 传感应用

中图分类号: TN25; O431

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201606.0853

Research progress of Goos-Hänchen shift

ZANG Mengdi^{a,b,c}, WANG Tingting^{a,b,c}, ZHANG Bo^{a,b,c}, SHEN Jingling^{a,b,c}

(a.Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging; b. Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education;
c.Physics Department, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: Goos-Hänchen(GH) shift is a kind of abnormal optical phenomenon. When a beam of light is incident to a different refractive index medium surface, the light total internal reflection occurs at the planar interface. The points of incidence and reflection are not at the same place, or there exists a tiny lateral shift for reflected light. This phenomenon is called as GH shift. In this paper, a qualitative explanation and quantitative analysis for GH shift according to K. Artmann's stationary phase theory is presented. Related work including theoretical research results and experimental observations of GH shift on metallic interface, dielectric grating structure, metal-cladding structure, photonic crystal materials, chiral materials have been summarized. The GH shift research at different electromagnetic frequency bands especially in terahertz band is introduced. The two kinds of methods for measuring GH shift: direct measurement and interference measurement have been introduced. Finally, two examples of temperature sensing and concentration sensing are introduced to demonstrate the applications of GH shift.

Keywords: Goos-Hänchen shift; stationary phase method; reflecting interface; terahertz wave; sensing applications

古斯汉欣(GH)位移于 1947 年被 Goos 和 Hänchen 首次发现^[1]。它是指光束在 2 种界面上发生全反射时, 反射点相对于入射点在相位上有一个突变, 反射光相对于入射光在空间上有一段距离, 这段距离被称为古斯汉欣位移。在不同界面不同偏振情况下产生的 GH 位移可以分为正向位移和负向位移。GH 位移的机理可以解释为: 入射光入射到界面分解为一系列沿不同方向的平面波, 这些平面波在反射时具有不同的相变, 反射平面波的叠加就得到反射光束的 GH 位移结果。一般古斯汉欣位移的位移量较小, 波长越长位移越明显。自发现以来古斯汉欣位移引起了学者们的广泛关注, 特别是随着超晶格、光子晶体、超材料等界面的出现以及太赫兹波科学技术的发展, 人们在各个电磁波段和不同反射界面对 GH 位移进行研究, 并提出了不同测量方法和应用。本文将从 GH 位移的理论解释、研究进展、测量方法及实际应用 4 个方面进行总结介绍。

收稿日期: 2016-01-25; 修回日期: 2016-04-24

基金项目: 国家重大科学仪器专项资助项目(2012YQ140005); 军口 863 资助项目; 国家自然科学基金资助项目(61505125); 北京市自然科学基金资助项目(4144069); 北京市教委科技发展计划项目(KM201410028004)

*通信作者: 沈京玲 email:sjl-phy@cnu.edu.cn

1 GH 位移的定性解释和定量计算

从理论上, GH 位移可以被解释为: 实际的入射光都不是理想的单色平面波, 而是具有一定的空间谱宽, 也就是说对于实际的光线, 虽然它们指向同一个入射点, 但入射角具有一角宽度 $\Delta\theta$ 。通过把入射光分解成一系列单色平面波, 每个平面波分量都具有与其他分量略有不同的波矢的切向分量。那么在全反射过程中, 每个平面波分量都会产生与其他分量稍有不同相移, 这些反射的平面波分量再合成以后, 就组成了实际的反射光束。反射光束强度的最大值与入射光强度的最大值之间会有一段横向偏移, 这就是 GH 位移。GH 位移可以利用 K. Artmann 提出的稳定相位法^[2], R. H. Renard 提出的能流方法^[3-4], M. McGuirk 提出的角谱表征法^[5], T. Tamir 提出的高斯光束下的数值法^[6]来定量计算, 其中最为常用的是稳定相位法计算古斯汉欣位移。K. Artmann 通过对 GH 位移进行物理上的解释给出了其位移的求解方法, 并给出了位移量的表达式, 如式(1)所示:

$$S = -\frac{1}{k} \frac{d\varphi}{d\theta} \quad (1)$$

式中: k 是入射光波矢; φ 是反射光与入射光之间的相移或者称为反射率的相位因子; θ 表示入射角。

2 近年来 GH 位移研究进展

2.1 不同界面的 GH 位移研究

GH 位移自发现以来就被广泛关注并进行深入研究^[7]。对 GH 位移的研究涉及全反射界面、简单界面、多层界面、光子晶体、左手手性材料界面等。GH 位移的研究首先是在全反射界面上被发现的。1947 年, Goos 和 Hänchen 首次证实了 GH 位移的存在^[1]。在简单界面 GH 位移的研究工作从理论到实验, 都有涉及。2007 年, M. Merano 等记录并观察了一束光入射到裸露金属表面后产生的 GH 位移^[8], 他们发现在金属面上的 p 偏振光产生的 GH 位移是负位移, 并且远大于 s 偏振光产生的正 GH 位移。测量得到的位移作为入射角的函数, 发现实验结果与理论预言相符合。2009 年, M. Merano 等再次在一个粗糙的金属镜表面记录了不同偏振下的 GH 位移^[9]。理论模拟和实验吻合度很好, 发现在不同界面的 GH 位移在一些小一点的角度, 位移量也可以被提高而不仅仅是只在掠入射角度入射时才有 GH 位移。2013 年, D. Ranganathan 小组用 633 nm 的可见光并采用干涉的方法实验测得了在金属铝表面产生的 GH 位移并提出了一种间接测量 GH 位移的方法^[10], 该方法简单方便。

此后, GH 位移的研究工作在有结构的界面也有相关研究。2001 年, C. Bonnet 等研究发现在近伍德相变附近, 在一个介质光栅表面观测到正向和负向的 GH 位移, 观测到 GH 位移大约是波长的 10 倍^[11]。2014 年, LI Jingjing 等研究发现, 在金属介质光栅结构上通过导模共振会产生巨大的正向和负向 GH 位移^[12]。模拟计算结果表明, 当与介质光栅发生导模共振时, 会产生位移量是光波长 5 000 多倍的 GH 位移, 还发现基于介质光栅结构的设计在理想情况下可避免欧姆损耗。

对于 GH 位移的研究不仅仅停留在对光栅结构的研究上, 人们逐步开始设计更为复杂的结构, 为了得到更大的 GH 位移。2014 年侯军勇等研究了含有损耗的双负介质导波层的棱镜波导耦合系统中的 GH 位移增强效应^[13]。通过仿真分析, 研究了介电常数、包层和导波层的厚度对 GH 位移的影响。结果表明, 利用双负介质做棱镜波导系统的导波层可以有效克服材料自身带来的损耗, 实现较大的 GH 位移。2015 年, LUO Li 小组研究模拟了在红外波段的棱镜-波导耦合系统结构上 GH 位移随温度的变化关系^[14]。相应的热光 GH 位移效应表明在不同的导波模式下 GH 位移和温度呈不同的线性关系, 基于温度对 GH 位移的影响, 可以设计一种温度传感装置。

为得到更大的 GH 位移, 更方便地测得 GH 位移, 逐渐开始研究在多层结构上的 GH 位移。2008 年曹庄琪给出了共振激发下 GH 位移增强必须满足的条件, 并利用波长 860 nm 的半导体激光在实验上测量到最大为 0.9 mm 的正向位移和 0.2 mm 的负向位移^[15]。2014 年, M. TANG 等在一个金属包络结构上实现了 1.5 mm 的 GH 位移, 入射光的光波长为 859 nm^[16]。可见, 利用金属包络结构得到了一个比较大的 GH 位移。

随着对光子晶体研究的逐步深入, GH 位移的研究工作逐渐开始涉及光子晶体材料^[17]。2010 年 V. V. Moskalenko 等在一维光子晶体结构上通过表面波诱导使得 GH 位移得到增强^[18]。使用波长为 532 nm 的激光入射, 通过一维光子晶体结构上的表面电磁波激发, 可以获得位移量是波长 30 倍的 GH 位移, 并且当一维光子晶体结构为 12 个四分之一波长的多层介质时, GH 位移量为 16 μm 。2012 年 Soboleve 等研究了光子晶体表面的 GH 位移, 由于布洛赫表面电磁波的激发加强, 利用远程显微镜就能观测到 GH 位移, 通过角度光谱仪可以测量到光子晶体表面的 GH 位移, 最大位移量达到 66 μm ^[19]。

随着手性材料研究的发展, 人们逐渐在左手材料上发现了 GH 位移^[20]。2008 年王成等设计了一种左手材料

复合双棱镜,研究了发生在其内部界面上的 GH 位移在透射共振点透射波的 GH 位移达到极大值,且极大值可达入射波波长的数十倍;发现入射角和光轴与界面的角度对透射波的 GH 位移有很大影响^[21]。此后在 2015 年,方振华等人发现在左手手性材料上可以产生负 GH 位移^[22]。当入射光频率和银杏枝手性材料谐振频率一致时,产生负的 GH 位移。当入射光与其谐振频率不一致时,产生正的 GH 位移。并且在 GH 位移为负时,随着角度从 41° 到 50° 变化过程中, GH 位移的位移量在减小。

2.2 太赫兹波段的 GH 位移研究

根据稳定位相法,正常情况下 GH 位移的位移量是和光波波长成正比。在之前的研究中,对 GH 位移的研究在不同波段均有涉及,比如可见光波段^[23-24]、红外波段^[25]、微波波段^[26]。随着太赫兹(THz)波段的电磁现象被广泛研究, GH 位移的研究也开始涉及该波段。由于 THz 波是位于微波和红外之间的电磁波,其波长较可见光长 2~3 个数量级, GH 位移更容易被观测到。但由于 THz 源和探测器的发展水平远不如其他电磁波波段,在 THz 波段的 GH 位移的研究还是理论多于实验。目前比较成功的一个直接测量 THz 波段 GH 位移的实验就是 2013 年本课题组李庆梅等人的工作^[27],利用环烯烃共聚物(Cyclo-Olefin Copolymer, COC)制成直角棱镜,首先对 THz 波在 COC 和空气界面的全反射进行模拟,并利用返波管(Backward-Wave Oscillator, BWO)产生的 0.206 THz 连续 THz 源的 GH 位移进行实验测量。测量得到 THz 波在 COC-air 界面处的全反射 GH 位移,在空气层厚变化过程中不同偏振的 THz 波 GH 位移量的改变,如图 1 所示。

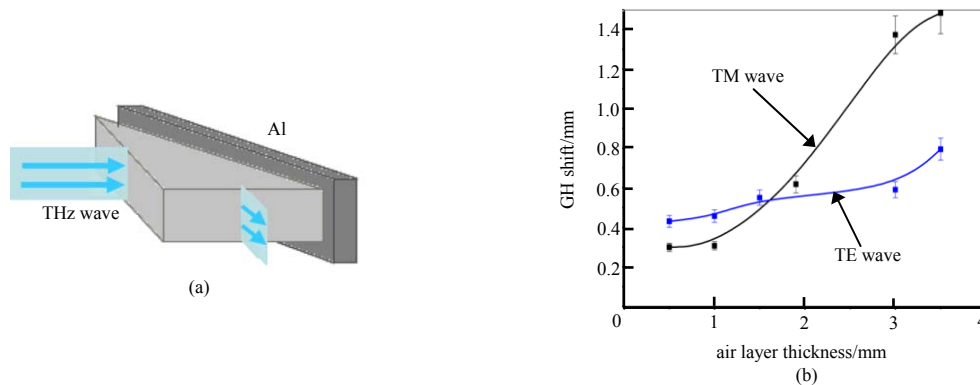


Fig.1 (a) Structure diagram of experimental system; (b) GH shift of s and p polarization with the change of air layer thickness
图 1 (a) 实验构型图; (b) s 和 p 偏振下随空气层厚变化的 GH 位移

2014 年 LI Jiusheng 等研究了 THz 波在棱镜石墨烯结构上产生的巨大 GH 位移^[28]。利用静态位相理论,对棱镜石墨烯结构上加电场作用下的 GH 位移进行了模拟。模拟结果显示得到的 GH 位移的大小是原本在 THz 波段 GH 位移的 200 多倍。图 2(a)所示是电控产生 GH 位移的结构图,图 2(b)是当频率为 1.5 THz 的 TE 偏振的 THz 波入射时,角度从 18.4° 变化到 19.25° 时不同电压下的 GH 位移。从模拟结果看到,在 18.949° 时,加电后得到的最大的 GH 位移大约为不加电压时得到的 GH 位移的 250 倍。2015 年,该团队在一个棱镜-金属-聚合物-金属多层结构界面上模拟了对非线性聚合物加电压改变其折射率后, GH 位移的变化^[29]。模拟了聚合物层厚度变化以及入射角度变化时, GH 位移的变化情况。研究发现,在折射率为 $n=1.59$ 和 $n=1.62$ 时, GH 位移随着聚合物层的厚度增加而减小。

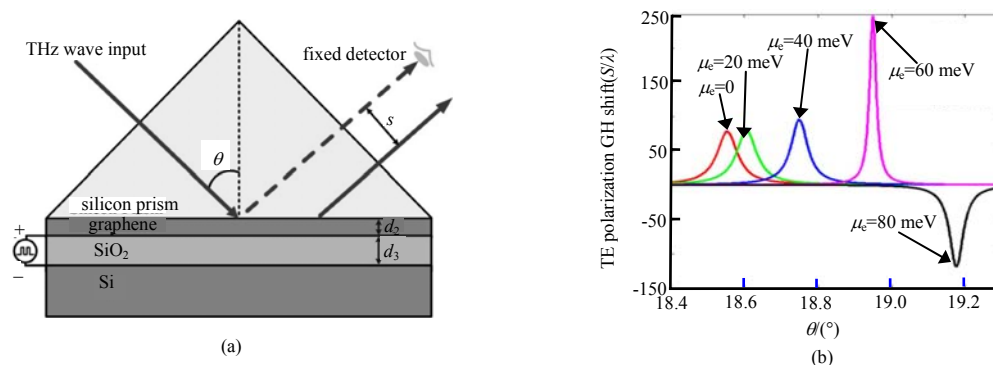


Fig.2 (a) Structure diagram of the interface under electric control; (b) GH shift as a function of angle under different voltages
图 2 (a) 电控 GH 位移结构图; (b) 不同电压下随角度变化的 GH 位移量

3 GH 位移的测量

3.1 直接测量 GH 位移

直接测量 GH 位移就是利用探测器直接测量界面处反射光出现的移动量,这是一种很常规的探测方法,利用直接法测量 GH 位移的研究有很多。例如在 2007 年, M. Merano 等测量到金属面上的 GH 位移,利用象限探测器接收信号,再通过锁相放大器探测反射光的移动情况,直接测量 GH 位移^[30]。2011 年, WAN Yuhang 小组利用电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)相机直接探测反射光的位置变化,得到 GH 位移。通过调整光子晶体包络结构的折射率,发现布洛赫表面波能够引起亚毫米量级的位移,并且最大的位移量可以达到波长的 750 倍^[31]。2013 年, LI Qingmei 在 THz 波段 COC-air 界面处利用热释电探测器直接探测界面反射光的移动,从而直接测得 GH 位移^[27]。

3.2 干涉法测 GH 位移

由于 GH 位移量一般是波长数量级,很多情况下利用探测器较难直接测得 GH 位移及其变化。因此近年提出并实践了使用间接的方法观测 GH 位移。最为有效的方法就是干涉法,其基本原理是,由于 GH 位移改变了光束的光程进而改变 2 束光的光程差,导致干涉条纹的变化,通过条纹移动反算出 GH 位移的位移量。

2013 年, D. Ranganathan 等利用在样品表面 s 和 p 偏振的 GH 位移量不同,得到具有光程差的反射光,利用偏振片将 2 个不同偏振的偏振光变为同偏振后,进行干涉,观测干涉条纹的移动情况,从而得到 GH 位移的变化量,如图 3 所示^[10]。2015 年,方振华等在测量银杏枝左手材料的 GH 位移时,采用了干涉方法测量 GH 位移^[22]。根据 s 和 p 这 2 束偏振光在银杏枝左手材料上的 GH 位移不同,2 束反射光的光程差发生变化,观测干涉条纹的移动情况。

2015 年本课题组研究了太赫兹波段 GH 位移在金属铝介质表面随温度变化的关系,实验测量发现 GH 位移的变化量随温度的变化关系基本成线性关系,当温度变化 78 °C,达到 101 °C 时, GH 位移的变化量可以达到 267.2 μm 。研究 GH 位移随温度变化关系时,本课题组采用干涉测量的方法测量 GH 位移。如图 4 所示,反射光产生 GH 位移,随着温度的变化 GH 位移量不断变化,光程差不断变化,干涉条纹发生移动。通过观测条纹移动情况,推算出 GH 位移量的变化^[32]。

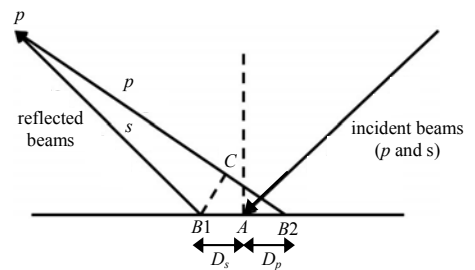


Fig.3 Different displacements of GH shift at sample surface under s and p polarizations
图 3 样品表面 s 和 p 偏振的 GH 位移量不同,反射光出现光程差

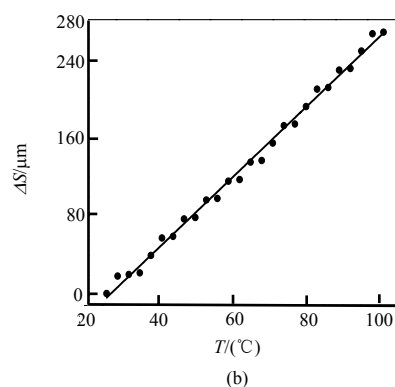
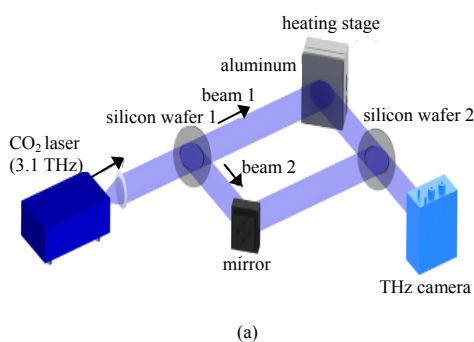


Fig.4 (a) Schematic diagram of the experimental system; (b) Increase of GH shift as a function of temperature of the reflection surface.
图 4 (a) 实验系统图; (b) GH 位移增加量与反射面温度的关系

4 GH 位移的应用研究

GH 位移具有广泛的应用价值。基于 GH 位移的传感器有较高的精确度和灵敏度。近年来, GH 位移在位置传感、温度传感和浓度传感器等方面都有相关应用研究。2012 年, 胡红武利用光束在对称双面金属包覆波导表面反射时 GH 位移具有极大的增强效应, 提出一种灵敏度极高的新型位移传感器, 可以观测微小位移的变化, 在实验上实现 8 μm 的微小位移传感^[33]。利用光电探测器直接探测在双面金属包络结构上产生的 GH 位移, 此位移

传感器相比于传统光强传感器,不再受激光光强涨落的影响。

随着研究的深入,逐渐发现 GH 位移随温度的变化而发生位移量的改变。2009 年, ZHAO Bin 等模拟研究发现在金属介质表面, GH 位移会随温度的变化而变化^[34]。研究给出了计算位移随温度变化的 Drude 模型,模拟了在布儒斯特角附近和掠入射角入射时, GH 位移随温度变化的关系。找到了理论计算和数值模拟之间的关系。2013 年, SUN Jingjing 等实际测量到在高阶导模共振情况下的 GH 位移随温度的变化^[35]。当温度从 50 °C 变化到 51.2 °C 时, GH 位移随温度升高而增大,实验测得温度每变化 0.2 °C,位移变化 76 μm 。升温和降温过程中位移变化曲线重合度很好,为 GH 位移的传感应用打下了基础。

GH 位移在溶液浓度变化的测量中也具有很大应用价值。2007 年, WANG Y.^[36]等介绍了一种基于 GH 位移效应的振荡波传感器,发现对称金属涂覆层波导超高阶模的辐射损耗和本征损耗是紧密联系的,并得到 GH 位移效应的极大增强。利用此传感器测量溶液浓度,结构如图 5(a)所示。以一组步长为 20 mg/L 浓度的氯化钠溶液(即图 5(b)中 a 为纯水, b、c、d、e 溶液的浓度依次增加 20 mg/L)进行分析,浓度每改变 20 mg/L,伴随着 2.0×10^{-6} mg/L 折射率变化, GH 位移变化至少 20 μm 。其结果如图 5(b)所示。

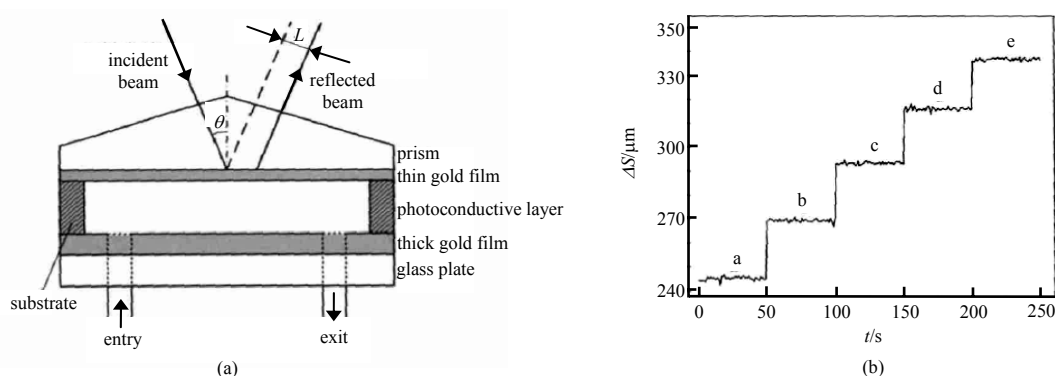


Fig.5 (a) Structure diagram of measuring the change of concentration; (b) Curve of GH shift with changing concentrations under NaCl solution
图 5 (a) 测量浓度变化的结构示意图; (b) GH 位移在 NaCl 溶液条件下随浓度变化曲线

5 结论

GH 位移自首次发现以来,一直受到广泛的关注和研究。利用 K. Artmann 提出的稳定相位理论能够对 GH 位移进行理论上的定性解释和定量计算。GH 位移的研究涉及多种界面,本文按时间顺序总结了 GH 位移在金属界面、介质光栅结构、光子晶体以及多层结构等界面上取得的大量理论和实验研究成果。这些研究追求的目标主要是获得更大 GH 位移,能得到比波长高 2 个数量级的位移量。由于 THz 波科学技术的不断发展,对于 GH 位移的研究开始转向 THz 波段,并取得了一定理论研究和实验观测结果。由于 THz 源和探测器等条件的限制,在 THz 波段对于 GH 位移的理论研究多于实验研究。由于一般 GH 位移量较小,以往利用直接测量方法测量 GH 位移有一定困难,于是提出使用干涉法测 GH 位移,即利用反射光产生的 GH 位移,或者 p 偏振和 s 偏振位移量的不同,改变了光程差,从而改变干涉条纹,间接测得 GH 位移。随着对 GH 位移研究的逐渐深入,发现 GH 位移可应用于较高精确度和灵敏度传感,包括位置传感、温度传感和溶液浓度传感,体现了 GH 位移研究的应用价值。

参考文献:

- [1] GOOS F, HÄNCHEN H. Ein neuer und fundamentaler versuch zur totalreflexion[J]. Annalen Der Physik, 1947, 436(7): 333–346.
- [2] ARTMANN K. Berechnung der seitenversetzung des totalreflektierten strahles[J]. Annalen Der Physik, 1948, 437(1–2): 87–102.
- [3] RENARD R H. Total reflection: a new evaluation of the Goos–Hänchen shift[J]. Journal of the Optical Society of America, 1964, 54(10): 1190–1196.
- [4] LAI H M, KWOK C W, LOO Y W, et al. Energy-flux pattern in the Goos–Hänchen effect[J]. Physical Review E Statistical Physics Plasmas Fluids & Related Interdisciplinary Topics, 2000, 62(5): 7330–7339.
- [5] MCGUIRK M, CARNIGLIA C K. An angular spectrum representation approach to the Goos–Hänchen shift[J]. Journal of the Optical Society of America, 1977, 67(1): 103–107.
- [6] TAMIR T, BERTONI H L. Lateral displacement of optical beams at multilayered and periodic structures[J]. Journal of the Optical Society of America, 1971, 61(1): 1397–1413.

- [7] 毛红敏. 非均匀介质透射波 Goos-Hänchen 位移的研究[J]. 红外与激光工程, 2012,41(11):2952-2955. (MAO Hongmin. Goos-Hänchen shift of transmitted wave from an inhomogeneous slab[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012,41(11): 2952-2955.)
- [8] MERANO M, AIELLO A, HOOFT G W, et al. Observation of Goos-Hänchen shifts in metallic reflection[J]. Optics Express, 2007,15(24):15928-15934.
- [9] MERANO M, GÖTTE J B, AIELLO A, et al. Goos-Hänchen shift for a rough metallic mirror[J]. Optics Express, 2009,17(3): 10864-10870.
- [10] PRAJAPATI C, RANGANATHAN D, JOSEPH J. Interferometric method to measure the Goos-Hänchen shift[J]. Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision, 2013,30(4):741-748.
- [11] BONNET C, CHAUVAT D, EMILE O, et al. Measurement of positive and negative Goos-Hänchen effects for metallic gratings near wood anomalies[J]. Optics Letters, 2001,26(10):666-668.
- [12] YANG R, ZHU W, LI J. Giant positive and negative Goos-Hänchen shift on dielectric gratings caused by guided mode resonance[J]. Optics Express, 2014,22(2):2043-2050.
- [13] 侯俊勇, 谢春茂. 含有损耗双负介质的棱镜波导中古斯汉森位移特性研究[J]. 激光杂志, 2014,2(2):32-33. (HOU Junyong, XIE Chunmao. Goos-Hänchen shift in a prism-waveguide with lossy double-negative material[J]. Laser Journal, 2014,2(2):32-33.)
- [14] TANG T, LUO L, LIU W, et al. Thermo-optic Goos-Hänchen effect in silicon-on-insulator waveguide[J]. Applied Physics B, 2015,123(3):1-8.
- [15] 曹庄琪. 古斯-汉欣位移的研究[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2008,5(5):505-508. (CAO Zhuangqi. The research of Goos-Hänchen shift[J]. Journal of Jiangxi Normal University(Natural Science Edition), 2008,5(5):505-508.)
- [16] TANG M, RAN M, CHEN F, et al. Narrow band optical filter using Goos-Hänchen shift in a cascaded waveguide structure[J]. Optics & Laser Technology, 2014(55):42-45.
- [17] 赵亚丽, 马富花, 江波, 等. ITO/Ag 光子晶体薄膜的制备及性能[J]. 光学精密工程, 2015,23(6):1516-1522. (ZHAO Yali, MA Fuhua, JIANG Bo, et al. Preparation and properties of ITO/Ag photonic crystal thin films[J]. Optics and Precision Engineering, 2015,23(6):1516-1522.)
- [18] MOSKALENKO V, SOBOLEVA I, FEDYANIN A. Surface wave-induced enhancement of the Goos-Hänchen effect in one-dimensional photonic crystals[J]. JETP Letters, 2010,91(8):382-386.
- [19] SOBOLEVA I V, MOSKALENKO V V, FEDYANIN A A. Giant Goos-Hänchen effect and Fano resonance at photonic crystal surfaces[J]. Physical Review Letters, 2012,108(12):123901.
- [20] 贾秀丽, 王晓鸥, 周忠祥, 等. 手性负折射率材料的最新进展[J]. 中国光学, 2015(4):548-556. (JIA Xiuli, WANG Xiao'ou, ZHOU Zhongxiang, et al. Latest progress on chiral negative refractive index metamaterials[J]. Chinese Optics, 2015(4): 548-556.)
- [21] 王成, 王政平, 张振辉. 左手材料复合双棱镜内部界面的古斯-汉欣位移[J]. 光子学报, 2009,37(11):2321-2326. (WANG Cheng, WANG Zhengping, ZHANG Zhenghui. The Goos-Hänchen shift of left-handed materials compound biprism internal interface[J]. Acta Photonica Sinica, 2009,37(11):2321-2326.)
- [22] 方振华, 罗春荣, 赵晓鹏. 银树枝左手超材料的反常古斯-汉欣位移[J]. 光学学报, 2015,3(3):206-211. (FANG Zhenghua, LUO Chunrong, ZHAO Xiaopeng. Negative Goos-Hänchen shift of left-metamaterials based on silver dendritic structure[J]. Acta Optica Sinica, 2015,3(3):206-211.)
- [23] WANG X, YIN C, SUN J, et al. High-sensitivity temperature sensor using the ultrahigh order mode-enhanced Goos-Hänchen effect[J]. Optics Express, 2013,21(11):13380-13385.
- [24] YANG Yang, LIU Ju, LI Zhiyuan. Giant transmission Goos-Hänchen shift in surface plasmon polaritons excitation and its physical origin[J]. Chinese Physics B, 2015,24(7):234-239.
- [25] TANG T, LUO L, LIU W, et al. Thermo-optic Goos-Hänchen effect in silicon-on-insulator waveguide[J]. Applied Physics B, 2015,120(3):1-8.
- [26] QU M, HUANG Z X. Frustrated total internal reflection: resonant and negative Goos-Hänchen shifts in microwave regime[J]. Optics Communications, 2011,284(10):2604-2607.
- [27] LI Q, ZHANG B, SHEN J. Goos-Hänchen shifts of reflected terahertz wave on a COC-air interface[J]. Optics Express, 2013, 21(5):6480-6487.
- [28] LI J S, WU J F, ZHANG L. Giant tunable Goos-Hänchen shifts based on prism/graphene structure in terahertz wave region[J]. IEEE Photonics Journal, 2014,6(6):1-7.

- [29] LI J S, WU J F, ZHANG L. Tunable terahertz wave Goos-Hänchen shift of reflected terahertz wave from prism-metal-polymer-metal multilayer structure[J]. Optics Communications, 2015(334):101-104.
- [30] MERANO M, AIELLO A, GW T H, et al. Observation of Goos-Hanchen shifts in metallic reflection[J]. Optics Express, 2007, 15(24):15928-15934.
- [31] WAN Y, ZHENG Z, KONG W. Giant Goos-Hanchen shift enhancement under total internal reflection by one-dimensional photonic crystals[J]. Frontiers in Optics. 2011, 36(18):3539-3541.
- [32] ZANG Mengdi, HE Ting, ZHANG Bo, et al. Temperature-dependent Goos-Hänchen shift in the terahertz range[J]. Optics Communications, 2016(370):81-84.
- [33] 胡红武. 基于古斯汉欣效应的皮米级位移传感器的实验研究[J]. 激光杂志, 2012, 32(5):10-11. (HU Hongwu. Experimental study on displace sensor based on the Goos-Hanchen effect[J]. Laser Journal, 2012, 32(5):10-11.)
- [34] ZHAO Bin, GAO Lei. Temperature-dependent Goos-Hänchen shift on the interface of metal/dielectric composites[J]. Optics Express, 2009, 17(24):21433-21441.
- [35] WANG X, YIN C, SUN J, et al. High-sensitivity temperature sensor using the ultrahigh order mode-enhanced Goos-Hänchen effect[J]. Optics Express, 2013, 21(11):13380-13385.
- [36] WANG Y, LI H, CAO Z, et al. Oscillating wave sensor based on the Goos-Hänchen effect[J]. Applied Physics Letters, 2008(92):061117-061117-3.

作者简介:



臧梦迪(1991-), 女, 北京市人, 硕士研究生, 主要从事太赫兹波段古斯汉欣位移研究. email: zangmengdi@sina.com.

王婷婷(1993-), 女, 北京市人, 在读本科生, 主要从事光电信息科学研究.

张 波(1984-), 男, 北京市人, 博士, 副教授, 研究生导师, 主要从事可控太赫兹超材料和有机太赫兹光电器件方面的研究.

沈京玲(1957-), 女, 北京市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事太赫兹光谱和非线性光学等方面的研究.

(上接第 852 页)

- [12] WANG D D, MIAO X Y, ZHAN H L, et al. Non-contacting characterization of oil-gas interface with terahertz wave[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2016, 59(7):1-2.
- [13] ZHAN H L, SUN S N, Z K, et al. Less than 6 GHz resolution THz spectroscopy of water vapor[J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(12):2104-2109.

作者简介:



王丹丹(1990-), 女, 山东省济宁市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为油气水界面光学探针表征与评价. email: 648770248@qq.com.

詹洪磊(1991-), 男, 贵州省铜仁市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹光谱计量和纳米岩石物理. email: hlzhan@126.com.

苗昕扬(1992-), 男, 辽宁省盘锦市人, 在读博士研究生, 研究方向为太赫兹技术及应用和纳米岩石物理.

宋 艳(1990-), 女, 河北省安国市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为井下流体光学探针表征与评价.

姜 晨(1991-), 女, 湖北省天门市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为油气资源光探测物理、材料及器件.

管丽梅(1992-), 女, 山东省诸城市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为 3-D 打印技术及应用.

赵 昆(1971-), 男, 山东省聊城市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为油气光学工程.