

银树枝左手超材料的反常古斯-汉欣位移

方振华 罗春荣 赵晓鹏

西北工业大学应用物理系智能材料实验室, 陕西 西安 710129

摘要 左手超材料的反常古斯-汉欣位移研究在理论提出后一直没有相关的实验报道。采用干涉法,通过实验测量了银树枝左手超材料在部分反射下的反常古斯-汉欣位移。利用沃拉斯顿棱镜将入射光分为s偏振光和p偏振光,在经过银树枝左手超材料表面反射后,两束偏振光相互干涉得到了干涉图样;通过对干涉图样进行分析计算,得到了样品的古斯-汉欣位移。实验结果证实,当入射光与银树枝左手超材料的谐振频率一致时,古斯-汉欣位移值为负。

关键词 材料;左手超材料;古斯-汉欣位移;干涉;谐振

中图分类号 O439 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0316001

Negative Goos-Hänchen Shift of Left-Handed-Metamaterials Based on the Silver Dendritic Structure

Fang Zhenhua Luo Chunrong Zhao Xiaopeng

Department of Applied Physics, Smart Materials Laboratory, Northwestern Polytechnical University,
Xi'an, Shaanxi 710129, China

Abstract To date the experimental reports on Goos-Hänchen (GH) shift of left-handed metamaterials (LHMs) have not been reported since it is theoretically demonstrated. The GH shift of LHMs based on the silver dendritic structure via interferometry is experimentally measured. Wollaston prism is utilized to divide the incident light into s polarized and p polarized light. Then the two polarized light beams are made to interfere with each other to obtain the interference pattern after being reflected from the surface of the sample. And the value of GH shift is obtained by analyzing and calculating the interference pattern. Experimental results confirm that GH shift is negative as the frequency of incident light is consistent with the resonant frequency of silver dendritic LHMs.

Key words materials; left-handed-metamaterials; Goos-Hänchen shift; interfere; resonance

OCIS codes 160.1190; 240.0310; 240.6680; 260.2110

1 引言

古斯-汉欣(GH)位移是指当一束光在传播过程中在介质的界面发生反射时,会沿着入射光线的横向分量方向发生一个相对于几何光学法线位置的偏移,这个发生在反射截面上的横向位移被定义为GH位移。GH位移作为光学材料的一个重要特性,一直以来都是研究的热点问题。研究人员一方面根据光传播的斯涅耳定律提出了很多模型来解释这种现象,如固定相模型^[1]、能量传播模型^[2]、射线模型^[3-4]以及平面波光线膨胀模型^[5-8]等。另一方面发展各种方法来测量准确的GH位移,比较具有代表性的是李春芳等^[9-11]采用的位置敏感探测器(PSD)的方法与Jayaswal等^[12]发展的弱测量的方法。PSD的方法利用位置敏感探测器的光敏特性精确测量光束中心强度最高点(束心)的位置来确定GH位移,这样就对入射光光束要求较高。该方法可以测量单次反射的GH位移。然而该方法仅仅研究了一束光的束心,却忽略了横截面的其他信息。弱测量

收稿日期: 2014-09-20; 收到修改稿日期: 2014-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(11174234, 51272215)、国家重点基础研究发展计划(2012CB921503)

作者简介: 方振华(1986—),男,博士研究生,主要从事左手超材料方面的研究。E-mail: leaf@mail.nwpu.edu.cn

导师简介: 罗春荣(1954—),女,教授,博士生导师,主要从事智能材料方面的研究。E-mail: luocr@nwpu.edu.cn

*通信联系人。E-mail: xpzhao@nwpu.edu.cn

的方法,通过将GH位移值通过弱测量的方法将很小的信号值通过锁相放大器放大反向推出GH位移值。这个方法克服了GH位移值极小和难以测量的困难,然而这种方法在放大过程中不可避免的将误差也放大了。2013年,Prajapati等^[13]发展了一种干涉法测量GH位移的方法,该方法通过沃拉斯顿棱镜^[14]将入射光分为s偏振光和p偏振光,再将两部分光在样品表面相干涉得到干涉条纹,通过对干涉条纹的分析计算得到GH的大小。该方法简单易行,将完全考量整个光束横截面的信息,通过光束的干涉条纹来精确计算出GH位移值,相比之前的测量方法有很大的改进。

左手超材料由于具有负相速度、负折射率、理想成像^[15]、电磁波调制^[16-17]、逆多普勒频移、反常Cerenkov辐射^[18]等奇异的物理性质^[19]成为近年来的研究热点。根据文献[20],在左手超材料与右手材料界面发生GH位移时,这个位移的方向与入射光线的横向分量是相反的,即会发生一个负的GH位移,也被称作反常GH位移。目前,在金属光栅^[21]、弱吸收与强吸收介质^[22-28]、透明介质平板^[29]和光子晶体^[30]等系统中都观察到了负的GH位移。然而,负的GH位移作为左手超材料的一个重要特性,尽管其对于左手超材料的进一步应用如光减速、光停止、光量子力学^[31-33]以及彩虹捕捉^[34]等有很重要的意义,但是至今却鲜有实验上的相关报道。银树枝左手超材料是由本实验室所发展的一个比较成熟的模型,在文献[35-38]中都已经有了相关的报道,具有平面聚焦负折射等效效应。本文借鉴Prajapati等^[13]的最新测试GH位移的方法设计实验研究了银树枝左手超材料的反常GH位移。

2 实验装置

在本实验中,测试了银树枝左手超材料与K9晶体两种样品。实验采用的银树枝状左手超材料样品是由自下而上的电沉积法^[37]制备的。具有银树枝+TiO₂+银树枝的多层结构。K9晶体样品作为对比样品。根据表面等离子激元效应^[39],由于金属的介电系数在可见光和红外波段为负数,因此当把金属和电介质组合为复合结构时会发生很多有趣的现象。当光波(电磁波)入射到金属与介质分界面时,金属表面的自由电子发生集体振荡,如果电子的振荡频率与入射光波的频率一致就会产生共振,这时就形成了一种特殊的电磁模式:电磁场被局限在金属表面很小的范围内并发生增强,在宏观的尺度上这一现象就表现为在特定波长,状态下的金属晶体的透光率的大幅提升。通过对样品的透射测试发现,制备的银树枝样品在可见光波段具有很好的谐振响应,透射峰位于红光波段。图1所示为左手超材料样品的扫描电镜图(SEM)及透射图谱。采用干涉法测量了银树枝左手超材料在谐振频段及非谐振频段的GH位移。

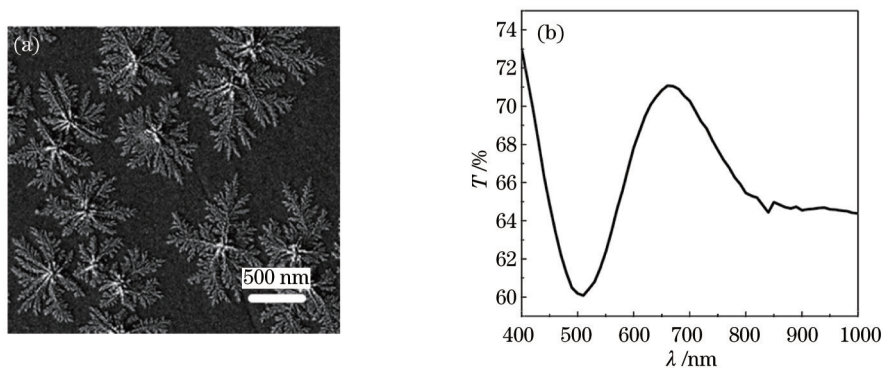


图1 (a)样品扫描电镜图;(b)透射图谱

Fig.1 (a) SEM image of sample; (b) transmission spectrum

实验装置如图2所示。光源采用波长为632.5 nm的红光氦氖激光器或者532 nm的绿光固体激光器。P1为偏振片,作为起偏器来控制入射光的偏振态,同时也可以调控s偏振光和p偏振光的相对强度,以保证在实验中得到清晰的干涉图样。632.5 nm的红光激光器为氦氖圆偏振激光器,在换532 nm绿光激光器时为了确保在起偏器之前同样的效果,在起偏器前加两个偏振方向互相垂直的偏振片P3和P4,这样当532 nm的激光器出射的偏振光经过两个偏振方向互相垂直的偏振片后变为圆偏振光,效果与圆偏振的红光激光器相同,只是改变了入射光的波长。Wollaston prism为沃拉斯顿棱镜,用来将穿过P1的入射光光束分为s偏振光

和 p 偏振光。M 为反射镜。beam splitter(BS)为宽带的分束镜,适用波长范围为 400~650 nm,对于本实验中采用的 632.5 nm 红光和 532 nm 绿光都适用。这样设置可以保证在切换光源时保证光路不改变,使得实验结果更具有可比性。样品用夹具固定在带刻度的可 360°旋转的平台上,以方便测量样品在不同入射角下的 GH 位移。白屏用来接收干涉条纹,白屏前放置一个可以在垂直于光传输方向旋转的检偏器 P2。采用电荷耦合元件(CCD)在同一固定位置记录检偏器 P2 在偏振角为 45°和 135°时得到的干涉图样。然后由 Matlab 软件处理计算观测到的干涉条纹,将两个干涉条纹对比得到相位差,经过计算得到 GH 位移。

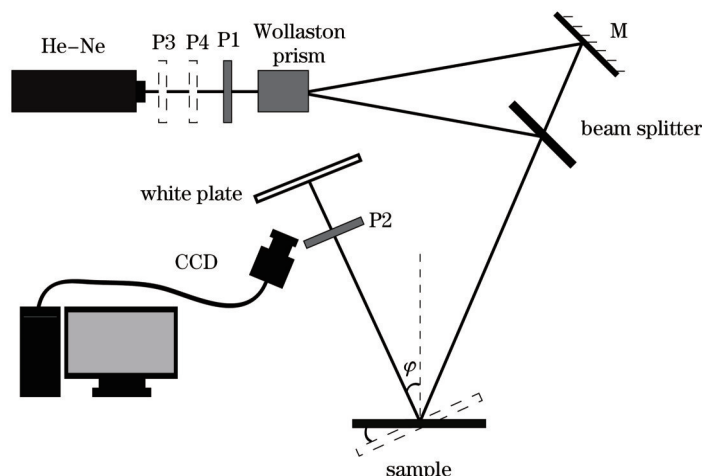


图2 实验设置示意图

Fig.2 Diagrammatic sketch of the experimental setup

3 实验过程

光源发出的非偏振激光经过起偏器 P1 变为偏振光,再通过沃拉斯顿棱镜将偏振光分为 s 偏振光和 p 偏振光两个分量,调整沃拉斯顿棱镜使得 s 偏振光和 p 偏振光在分开一定角度的前提下保证水平出射。本实验中,沃拉斯顿棱镜将两分量分开的角度为 15°。调整起偏器 P1 的角度使得从沃拉斯顿棱镜出射的 s 偏振光和 p 偏振光强度基本相同。s 偏振光直接照射到宽带半透半反镜上。p 偏振光照射到反射镜 M 上,经反射镜 M 反射到宽带半透半反镜,调整 M 的位置确保 p 偏振光从 M 反射到宽带半透半反镜透过宽带半透半反镜后与 s 偏振光重合。两分量一同传输到待测样品表面,在样品表面反射过程中发生 GH 位移。然后光继续传输到准备好的白屏上,在白屏前放置检偏器偏振片 P2,在 P2 偏振角为 45°和 135°时可以观察到 s 偏振光和 p 偏振光相干涉的干涉条纹,P2 偏振角为其他角度时只能观察到不规则的光斑。用电荷耦合器件(CCD)记录 P2 不同偏振角时白屏上接收到的图像。为了测量不同入射角时样品的 GH 位移,以入射光垂直照射到样品表面又垂直反射回反射镜 M 表面同一点时旋转平台的角确定为 0°入射角,在此基础上旋转样品平台确定入射角的不同入射角度。重复上述过程来测量不同入射角时的 GH 位移。

实验过程中,s 偏振光和 p 偏振光两个分量大部分的路径是相同的,只有在 BS 之前的一段路径不同,即光在通过沃拉斯顿棱镜分为 s 偏振光和 p 偏振光两个分量之后,s 偏振光的路径比 p 偏振光多了一段。这里将沃拉斯顿棱镜颠倒放置使得 p 偏振光照射到 M1 的路径比 s 偏振光直接传输到 BS 的路径要短,这样设置后 s 偏振光和 p 偏振光的路径几乎相同。消除了两束光的路径差异确保了实验结果的可靠性。另外,在实验过程中入射光以不同角度入射时,将白屏前面的偏振片旋转到 0°或者 90°使得只有 p 偏振光或者 s 偏振光通过,用 CCD 记录此时白屏上的图像,此时的图像一方面说明除了 45°和 135°位置其他位置并没有干涉条纹的出现。另一方面,这时可以观察到 s 偏振光和 p 偏振光的强度差异,可以通过细微调整起偏器 P1,改变两分量的相对强度来提升白屏上观察到的条纹的清晰度。

通过对 s 偏振光和 p 偏振光两个分量其中之一的微调,可以控制在白屏上的干涉条纹数目。实验中,为了便于观察及保证计算的精度,调整白板上可以观察到的条纹数目为 7 条。在得到的干涉图像上标记中间

最亮的亮纹标记为0级,向上和向下亮度渐次减弱分别标记为+1,+2,+3和-1,-2,-3。这样在将45°和135°的干涉条纹图样剪切粘合在一起分析时对比同级次的条纹就可以确定GH位移的方向,也方便测量GH位移的大小。

4 实验结果及讨论

按上述方法,首先在632.5 nm红光入射时分别对银树枝样品和K9晶体样品进行测试,得到红光入射时两种样品在不同入射角的干涉图样,通过CCD采集保存到电脑。然后将光源更换为532 nm的绿光激光器,在绿光光源与起偏器P1之间添加两个偏振片P3和P4,调整P3和P4偏振方向使得在入射光传输到起偏器P1时同红光一样为圆偏振光。在绿光入射时,同样使得入射光通过沃拉斯顿棱镜后得到s偏振光和p偏振光。重复上述实验过程,分别对银树枝样品和K9晶体进行绿光入射的GH位移测试,得到绿光入射时两种样品在不同入射角下的干涉图样。这样分别得到了入射角从40°到50°时银树枝样品对于谐振波段的红光和非谐振波段的绿光的干涉图样,以及K9晶体对于同样的红光和绿光的干涉图样。对干涉图样进行计算分析即可得到相应的GH位移。

图3为入射角为44°时获得的几种干涉图样。图3(a)与(b)为红光入射时银树枝涉图水平拼接后的对比图。从图3(a)~(d)中可以明显地观察到,在P2角度为45°和135°时都得到了明显的干涉条纹,并且从对比图来看都有一定的相位移动,即在银树枝样品和K9晶体表面都观测到明显的GH位移。通过对比图3(a)与(c)可以发现,632.5 nm红光入射时,银树枝样品界面处的GH位移为负;532 nm绿光入射时,银树枝样品界面处的GH位移为正,银树枝样品对于632.5 nm红光与532 nm绿光入射时的GH位移的方向相反。上述结果表明,在入射光与银树枝样品的谐振频率一致时,GH位移为负;在入射光与样品谐振频率不一致时,GH位移为正。

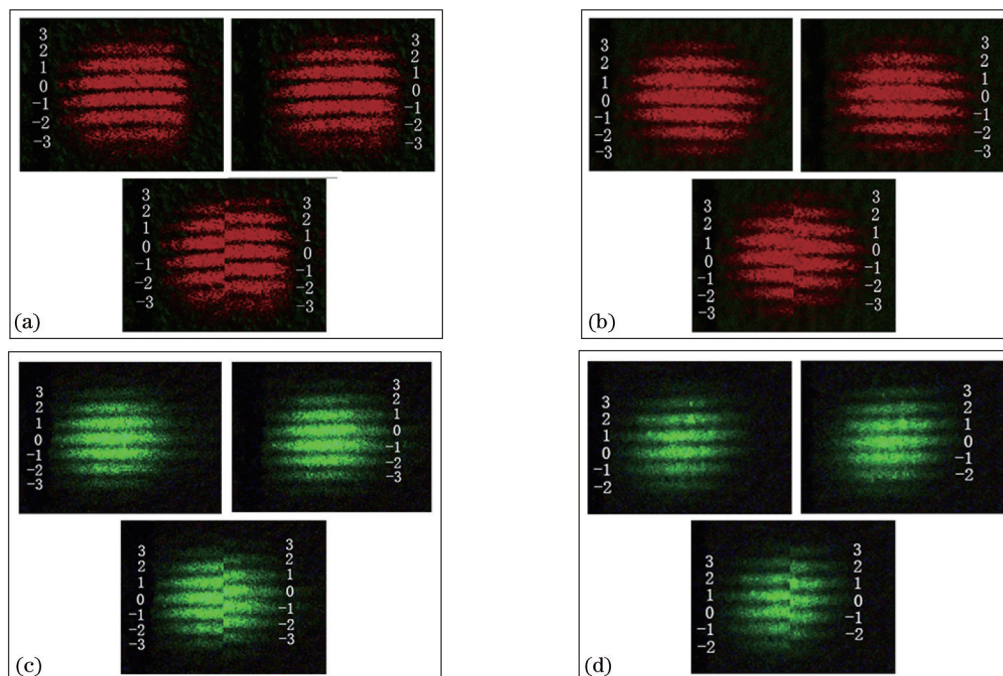


图3 入射角为44°的干涉图。(a)银树枝样品红光入射;(b)K9晶体红光入射;(c)银树枝样品绿光入射;(d) K9晶体绿光入射
Fig.3 Interferogram at the incident angle of 44°. (a) Red light incident on silver dendritic sample; (b) red light incident on K9 crystal; (c) green light incident on silver dendritic sample; (d) green light incident on K9 crystal

测量的GH位移大小如图4所示。分别测试了银树枝样品和K9晶体分别对于红光和绿光入射时的GH位移。当红光入射时,入射光频率与银树枝样品谐振频率一致,测得的GH位移为反常GH位移;当绿光入射时,入射光频率与银树枝样品谐振频率不一致,测得的GH位移为正GH位移。同时可以看到普通样品K9晶体不受入射光频率的影响在红光和绿光入射时都为正GH位移。随着入射角的增大GH位移绝对值减小。

从GH位移的测试结果可以看到,分别测试了K9晶体和银树枝样品分别对于绿光和红光入射时的GH位移。4条曲线所示的GH位移的绝对值都随入射角的增大而减小。且只有在红光入射时的银树枝左手材料的GH位移方向为负,在入射角从 41° 增加到 50° 过程中GH位移从630 nm减小至450 nm。变化范围在 $1\lambda \sim 2\lambda/3$ 左右。

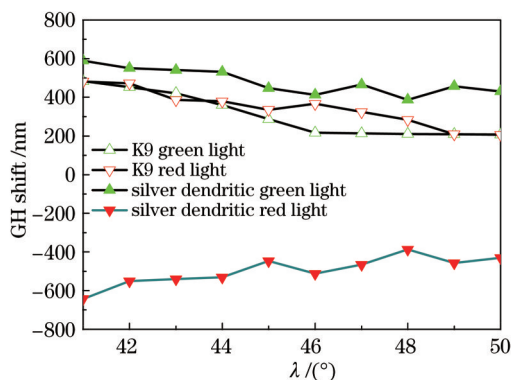


图4 不同样品的测量结果

Fig.4 Measured results of different samples

5 结 论

采用的银树枝左手超材料样品谐振峰位于红光波段,入射光由空气入射到样品。实验测得银树枝样品在红光入射时GH位移为负,在绿光入射时GH位移为正;K9晶体在红光与绿光入射时GH位移都为正。银树枝左手超材料样品在入射光波段和样品谐振波段一致时,得到的GH位移方向与普通样品相反,与入射光波段和样品谐振波段不一致时也相反。而空气为右手介质材料,说明银树枝样品在入射光波段和样品谐振波段一致时表现为左手材料性质,入射光波段和样品谐振波段不一致时表现为右手材料性质。表明干涉法是一种简单易行的测量GH位移的方法,另外,该方法同样适用于测量其他种类的二维超材料界面处的GH位移。也从实验角度上证实银树枝左手超材料对于谐振波段入射光的反常GH效应。反常GH位移的实验测量对于进一步研究左手超材料的光停止、彩虹捕捉等效应有着重要的意义。

参 考 文 献

- 1 K Artmann. Berechnung der seitenversetzung des totalreflektierten Strahles [J]. Annalen der Physik, 1948, 437(1-2): 87-102.
- 2 R H Renard. Total reflection: A new evaluation of the Goos-Hänchen shift [J]. J Opt Soc Am, 1964, 54(10): 1190-1196.
- 3 C K Carniglia, K R Brownstein. Focal shift and ray model for total internal reflection [J]. J Opt Soc Am, 1977, 67(1): 121-122.
- 4 H Kogelnik, H P Weber. Rays, stored energy, and power flow in dielectric waveguides [J]. J Opt Soc Am, 1974, 64(2): 174-185.
- 5 B R Horowitz, T Tamir. Lateral displacement of a light beam at a dielectric interface [J]. J Opt Soc Am, 1971, 61(5): 586-594.
- 6 J Hugonin, R Petit. General study of displacements at total reflection [J]. J Opt, 1977, 8(2): 73-87.
- 7 H Lai, F Cheng, W Tang. Goos-Hänchen effect around and off the critical angle [J]. JOSA A, 1986, 3(4): 550-557.
- 8 M Mcguirk, C K Carniglia. An angular spectrum representation approach to the Goos-Hänchen shift [J]. J Opt Soc Am, 1977, 67(1): 103-107.
- 9 Li Chunfang, Yang Xiaoyan, Duan Tao, *et al.*. Microwave measurement of dielectric film-enhanced Goos-Hänchen shift [J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(6): 753-755.
李春芳, 杨晓燕, 段 毅, 等. 电介质膜增强的 Goos-Hänchen 位移的微波测量[J]. 中国激光, 2006, 33(6): 753-755.
- 10 M Merano, A Aiello, M V Exter, *et al.*. Observing angular deviations in the specular reflection of a light beam [J]. Nature Photonics, 2009, 3(6): 337-340.
- 11 F Pillon, H Gilles, S Girard, *et al.*. Goos-Hänchen and Imbert-Fedorov shifts for leaky guided modes [J]. JOSA B, 2005, 22(6): 1290-1299.
- 12 G Jayaswal, G Mistura, M Merano. Weak measurement of the Goos-Hänchen shift [J]. Opt Lett, 2013, 38(8): 1232-1234.
- 13 C Prajapati, D Ranganathan, J Joseph. Interferometric method to measure the Goos-Hänchen shift [J]. JOSA A, 2013, 30(4): 741-748.
- 14 Zhu Huafeng, NanYujie, Yun Maojin, *et al.*. Precise analysis of the intensity splitting ratio of double Wollaston prism [J]. Acta

- Optica Sinica, 2012, 32(6): 0623002.
朱化凤, 南玉杰, 云茂金, 等. 双沃拉斯顿棱镜光强分束比精确分析 [J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0623002.
- 15 J B Pendry. Negative refraction makes a perfect lens [J]. Phys Rev Lett, 2000, 85(18): 3966–3969.
- 16 Yuanyuan Chen, Shanhong Huang, Xiaona Yan, *et al.*. Electromagnetic tunneling through conjugated single-negative metamaterial pairs and double-positive layer with high-magnetic fields [J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(10): 101601.
- 17 Bo Na, Jinhui Shi, Chunying Guan, *et al.*. From electromagnetically induced transparency to absorption in planar optical metamaterials [J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(11): 111602.
- 18 R A Shelby, D R Smith, S Schultz. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. Science, 2001, 292(5514): 77–79.
- 19 Huang Zhenyong. Dispersion and equal-inclination interference characteristics of left-handed materials [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(9): 091602
黄振永. 左手材料的色散和等倾干涉 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(9): 091602.
- 20 D K Qing, G Chen. Goos-Hänchen shifts at the interfaces between left- and right-handed media [J]. Opt Lett, 2004, 29(8): 872–874.
- 21 C Bonnet, D Chauvat, O Emile, *et al.*. Measurement of positive and negative Goos-Hänchen effects for metallic gratings near Wood anomalies [J]. Opt Lett, 2001, 26(10): 666–668.
- 22 J Götte, A Aiello, J Woerdman. Loss-induced transition of the Goos-Hänchen effect for metals and dielectrics [J]. Opt Express, 2008, 16(6): 3961–3969.
- 23 H Lai, S Chan. Large and negative Goos-Hänchen shift near the Brewster dip on reflection from weakly absorbing media [J]. Opt Lett, 2002, 27(9): 680–682.
- 24 H Lai, S Chan, W Wong. Nonspecular effects on reflection from absorbing media at and around Brewster's dip [J]. JOSA A, 2006, 23(12): 3208–3216.
- 25 P Leung, C Chen, H P Chiang. Large negative Goos-Hänchen shift at metal surfaces [J]. Opt Commun, 2007, 276(2): 206–208.
- 26 M Merano, A Aiello, M G W Hooft, *et al.*. Observation of Goos-Hänchen shifts in metallic reflection [J]. Opt Express, 2007, 15(24): 15928–15934.
- 27 Y Wang, Y Liu, J Xu, *et al.*. Numerical study of lateral displacements of Gaussian beams reflected from weakly absorbing media near the Brewster dip and reflected from strongly absorbing media [J]. J Opt A: Pure and Appl Opt, 2009, 11(10): 105701–105707.
- 28 W J Wild, C L Giles. Goos-Hänchen shifts from absorbing media [J]. Phys Rev A, 1982, 25(4): 2099–2101.
- 29 C F Li. Negative lateral shift of a light beam transmitted through a dielectric slab and interaction of boundary effects [J]. Phys Rev Lett, 2003, 91(13): 133903.
- 30 J He, J Yi, S He. Giant negative Goos-Hänchen shifts for a photonic crystal with a negative effective index [J]. Opt Express, 2006, 14(7): 3024–3029.
- 31 A C Ji, W M Liu, J L Song, *et al.*. Dynamical creation of fractionalized vortices and vortex lattices [J]. Phys Rev Lett, 2008, 101(1): 010402.
- 33 A C Ji, Q Sun, X C Xie, *et al.*. Josephson effect for photons in two weakly linked microcavities [J]. Phys Rev Lett, 2009, 102(2): 023602.
- 33 A C Ji, X C Xie, W M Liu. Quantum magnetic dynamics of polarized light in arrays of microcavities [J]. Phys Rev Lett, 2007, 99(18): 183602.
- 34 K L Tsakmakidis, A D Boardman, O Hess. 'Trapped rainbow' storage of light in metamaterials [J]. Nature, 2007, 450(7168): 397–401.
- 35 B Liu, X Zhao, W Zhu, *et al.*. Multiple pass-band optical left-handed metamaterials based on random dendritic cells [J]. Advanced Functional Materials, 2008, 18(21): 3523–3528.
- 36 H Liu, X Zhao. Metamaterials with dendriticlike structure at infrared frequencies [J]. Appl Phys Lett, 2007, 90(19): 191904.
- 37 X Zhao. Bottom-up fabrication methods of optical metamaterials [J]. J Materials Chemistry, 2012, 22(19): 9439–9449.
- 38 X Zhou, X Zhao, Y Liu. Disorder effects of left-handed metamaterials with unitary dendritic structure cell [J]. Opt Express, 2008, 16(11): 7674–7679.
- 39 Ren Mengxin, Xu Jingjun. Surface plasma polariton enhanced nonlinearity and applications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(8): 080002.
任梦昕, 许京军. 表面等离子体激元增强非线性的原理及应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8): 080002.

栏目编辑: 张浩佳