

文章编号: 1000-5862(2018)01-0052-05

基于双折射 MIM 结构的增强光自旋霍尔效应研究

殷 澄^{1,3}, 王贤平², 阚雪芬¹, 戴海浪³, 李 建¹, 韩庆邦¹

(1. 河海大学物联网工程学院, 江苏 常州 213022; 2. 江西师范大学物理与通信电子学院, 江西 南昌 330022;

3. 上海交通大学物理与天文学院, 上海 210094)

摘要: 光自旋霍尔效应所产生的横向 IF(Imbert-Fedorov) 位移一般仅为亚波长量级, 因此极大地限制了该效应在精密度量领域的应用. 该文提出一种金属/双折射材料/金属(MIM)的多层结构, 通过直接耦合方式激发该结构中的振荡模式, 并利用双折射特性形成偏振相关的小角度共振, 以此来增强光自旋霍尔效应. 理论分析表明: 上述设想可将可见光波段的横向 IF 位移增强到可以直接观察的亚毫米甚至毫米量级.

关键词: 光自旋霍尔效应; MIM 结构; 横向 IF 位移

中图分类号: O 431.2; O 484.41

文献标志码: A

DOI: 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2018.01.09

0 引言

一束光在介质界面上发生的反射和折射并不完全遵守几何光学, 实际的反射和折射光会产生位于入射面内和垂直于入射面的平移和角移(本文仅仅讨论平移效应), 前者被称为 Goos-Hänchen(简称 GH) 位移, 后者被称为 Imbert-Fedorov(简称 IF) 位移^[1]. 其中, GH 效应起源于反射或透射系数的色散, 文献[2]利用双面金属包覆波导结构使 859 nm 的激光光束产生了 1.5 mm 的 GH 位移; 相比之下 IF 则更难测量, 在 O. Hosten 等^[3]的实验研究中, 利用弱测量得到的 IF 位移仅为 70 nm. M. Onoda 等^[4]在 2004 年指出 IF 位移其实是光的自旋霍尔效应的表现, 其物理根源是光束的角动量守恒(自旋-轨道相互作用)^[5]. 作为一个刚起步却普遍存在的新研究方向, 光自旋霍尔效应在纳米光子学中将变得越来越重要. 其实, 对光的角动量的研究有着很长的历史, 但直到 1992 年 L. Allen 等关于轨道角动量的研究才使得整个领域被广泛关注^[6-7]. 光束可以同时具有自旋角动量、内轨道角动量和外轨道角动量 3 种, 而前两者在一定程度上是相通的, 空间折射率分布相当于外力场, 因此在反射和折射的过程中, 为了维持总角动量的守恒, 具有相反自旋角动量的左旋

光和右旋光会获得相反的外轨道角动量, 由此产生方向相反的 IF 位移^[5]. 有关光自旋霍尔效应的相关理论经 K. Y. Bliokh 和 A. Aiello 等发展和完善已趋于成熟^[5, 8-10]. 在实验方面, 北京大学龚旗煌小组利用弱测量方法研究了不同偏振态在空气和棱镜界面反射时的 IF 位移随入射角的变化规律^[11]. 罗海陆课题组利用布儒斯特角反射系数的差异来产生增强效应, 测量到了 3 200 nm 的巨大自旋分裂^[12]. 除此之外, 各种基于表面等离子激元^[13]和超表面^[14]的微结构的增强效应也在广泛深入研究之中.

众所周知, 在金属/介质界面可以激发传输型表面等离子体波, 远离界面时电磁场迅速衰减. 对层状的金属/介质/金属(简称为 MIM) 结构来说, 当介质层厚度比较小时, 由 2 个界面上的表面等离子体波相互耦合可形成对称模式和反对称模式, 其中反对称模式在介质层厚度趋于零的极限情况下不会截止^[15]. 随着介质层厚度的增加, MIM 结构可以容纳更多的模式, 这些振荡模式的模阶序数比较高, 所以被称为高阶导模. 从波导观念来看, 可以把金属层称为包覆层, 介质层称为导波层. 针对高阶导模开展了一些前期研究工作, 比如利用它的模式密度大、模式间易耦合的特点, 实现了圆锥形的相干光空间辐射^[16]; 利用高阶模式的场增强效应实现了对大量二氧化硅微球的光俘获等^[17]; 利用高阶模的激发金属

收稿日期: 2017-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(11404092, 11574072, 61505073), 江苏省自然科学基金(SBK2014043338), 第 60 批博士后基金(2016M601586)和中央高校基本科研业务费专项资金(2017B14714)资助项目.

作者简介: 殷 澄(1983-), 男, 江苏常州人, 副教授, 博士, 主要从事光波理论与器件的研究. E-mail: cyin.phys@gmail.com

纳米粒子的局域表面等离子共振来实现表面拉曼增强^[18]. 基于上述结构,本文提出一种增强光的自旋霍尔效应的实验设想:通过引入双折射材料来破坏高阶模式偏振无关的特性,并通过波导结构参数的优化和激发条件的匹配来实现小角度共振. 理论研究表明,基于该设想可以实现亚毫米甚至毫米量级的 IF 位移,若可实现,将极大程度地开拓该效应在新型微纳米光子器件、集成光路、芯片实验室等领域的应用.

1 基本原理

本文采用的 MIM 波导结构如图 1 所示,从上至下依次为: (i) 金属耦合层,通常为 30 nm 左右的银膜; (ii) 双折射材料层,厚度范围为 0.01 ~ 1.00 mm,为了确保波导层的双折射特性,其光轴应该与波导表面平行. 另外,为了实现高阶模式的完全耦合,也可以利用晶体的电光效应,使用外电场对其双折射现

$$E(x) = \begin{cases} A_1 \exp(i\kappa_1(x - h_1 - h_2)) + B_1 \exp(-i\kappa_1(x - h_1 - h_2)), & x > h_1 + h_2, \\ A_2 \exp(\alpha_2(x - h_1)) + B_2 \exp(\alpha_2(x - h_1)), & h_1 < x < h_1 + h_2, \\ A_3 \exp(i\kappa_3 x) + B_3 \exp(-i\kappa_3 x), & 0 < x < h_1, \\ B_4 \exp(\alpha_4 x), & x < 0 \end{cases}$$

其中 h_1, h_2 分别是导波层和耦合层的厚度,而 n_m, n_a, n_g 分别是金属、空气和导波层的折射率,导模的传播常数可表示为 $\beta = \kappa n_a \sin \theta$, 且 $\kappa_i = (\kappa^2 n_i^2 - \beta^2)^{1/2}$, $\alpha_i = (\beta^2 - \kappa^2 n_i^2)^{1/2}$. 利用电磁场的分布可精确计算出导模的反射系数 $r = B_1/A_1$, 数学表达式如下:

$$r = (r_{12} + \exp(-i2\phi)) / (1 + r_{12} \exp(-i2\phi)), \quad (1)$$

其中 $r_{12} = (\kappa_1 - i\alpha_2) / (\kappa_1 + i\alpha_2)$, $\phi = i\alpha_2 h_2 + \arctan\left(\frac{i\alpha_4}{\kappa_3} \tan \varphi\right)$, $\varphi = m\pi + \arctan(\alpha_4/\kappa_3) - \kappa_3 h_1$.

若数值计算 TE 模随入射角 θ 变化的反射率 $R = |r|^2$, 则可得到一系列共振吸收峰,每一个共振吸收峰对应了一个高阶模式,即当入射角正好满足模式的位相匹配条件时,耦合效率达到最高,此时入射光

象进行有效调制; (iii) 厚的金属衬底,通常为超过 200 nm 厚的银膜,用于阻止光能的底部泄露. 在图 1 中并没有画出调制光电效应所必须的外电极,其中金属衬底层可以直接用于电极,而金属耦合层由于厚度比较薄,会导致施加的电压不均匀. 解决这一问题的方案可以是在介质层与金属耦合层之间增加一层透明导电薄膜. 在这种情况下,导波层将由两层薄膜组成,这会使波导的能量本征方程产生一些变化,但并不改变或增加其物理图像,比如导波层中的电磁场依旧是振荡场,高阶导模的传播常数依旧是分离的. 为简化起见,本文将导波层看作是同一种材料构成的单层薄膜.

图 2 给出了 MIM 波导结构的基本参数定义,通常情况下,当导波层厚度足够大时,高阶模式是偏振无关的. 即使引入了双折射特性以后,对于不同的偏振,导波层的折射率 n_g 不同,但它们物理公式在形式上是类似的. 以 TE 模式为例,根据波导理论,它的电磁场分布均可以表示为

的能量会耦合进波导导模;与此同时,入射光的反射光部分与波导导模的泄露部分正好达到相干相消,使得反射率达到最低,而能量大部分进入导波层,并且沿着导波层传播. 上述处理的方法是完全精确的.

为了导出波导的能量本征方程,可以把整个波导系统近似看成一个 3 层结构,即把耦合层的厚度看作无限大(即看作一个标准的 MIM 结构),这种近似其实是忽略了耦合层的辐射损耗. 在这种近似下,TE 模式的能量本征方程可以写作

$$\kappa_3 h_1 = m\pi + 2\arctan(\alpha_2/\kappa_3), \quad (2)$$

而 TM 模式的本征方程可以写作

$$\kappa_3 h_1 = m\pi + 2\arctan(\varepsilon_3 \alpha_2 / (\varepsilon_2 \kappa_3)). \quad (3)$$

比较(2)式和(3)式可知,考虑到导波层厚度为毫米或亚毫米量级时产生的巨大光程,可以忽略

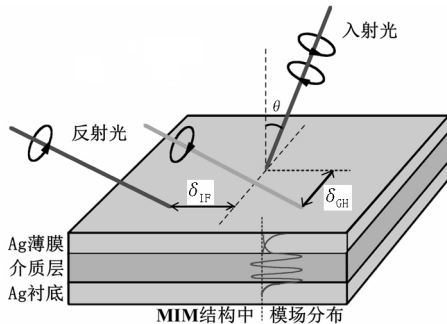


图 1 MIM 结构增强 IF 位移原理示意图

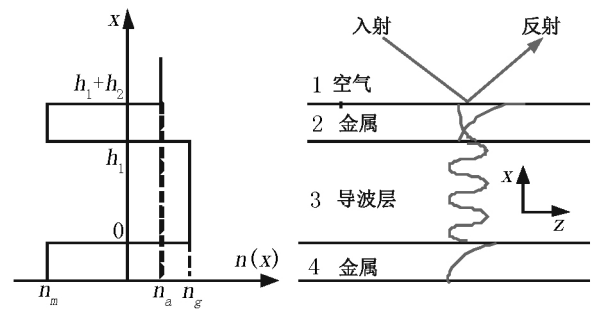


图 2 MIM 波导结构参数和高阶导模的场分布示意图

等式右边第2项,因此2个等式可以近似写作 $\kappa_3 h_i \approx m\pi$, 其中 m 的量级约为 10^3 . 这即为高阶模式的偏振无关特性,已经被实验所证实^[19].

根据文献[20],多层介质上的反射光所产生的 IF 位移公式为

$$\delta_{r\pm}^H = \mp \lambda / (2\pi) (1 + |r_s| / |r_p| \cos(\varphi_s - \varphi_p)) \cot \theta_i, \\ \delta_{r\pm}^V = \mp \lambda / (2\pi) (1 + |r_p| / |r_s| \cos(\varphi_p - \varphi_s)) \cot \theta_i \quad (4)$$

其中 H, V 分别代表入射线偏光的偏振方向与入射面水平或者垂直2种情况,下标的 r 代表反射,正负号分别代表左旋光和右旋光分量. 多层结构的 s, p 光的反射系数分别为 $r_{s,p} = |r_{s,p}| \exp(i\varphi_{s,p})$. 从(4)式可以看出,在垂直入射的情况下,已经无法严格区分 H, V 偏振和 s, p 光反射系数了,因此垂直入射的 IF 位移趋近于0. 通常情况下,为了获得大的 IF 位移必须采用增大 $|r_s| / |r_p|$ 或者 $|r_p| / |r_s|$ 的比值,比如表面等离子体共振或者布儒斯特角激发等. 到目前为止,还没有尝试利用增大 $\cot \theta_i$ 的方法来增大 IF 位移,一方面这是因为通常认为小角度尤其靠近垂直入射时,IF 位移会变小;另一方面是因为各种已知的共振机制很少出现在小角度范围内. 这里要指出,虽然在严格的垂直入射的情况下,IF 位移是等于0的,但是这并不妨碍在小角度范围内,由于共振而存在一个超大的 IF 位移. (i) 通过共振效应可以提供巨大的 $|r_s| / |r_p|$ 或者 $|r_p| / |r_s|$; (ii) 较小的入射角 θ_i 会产生一个极大的 $\cot \theta_i$; (iii) 这2种增强机制共同作用是乘积的关系,从(4)式可以看出,假设 $|r_s| / |r_p|$ 或者 $|r_p| / |r_s|$ 提供了10倍的增强,而 $\cot \theta_i$ 也提供了10倍的增强,最终的增强结果是100倍. 综上所述,找到一个小角度的偏振相关的共振机制,或者说是对应的多层膜结构,将是产生巨大的 IF 位移的关键.

2 IF 位移增强原理与数值验证

首先证明利用双折射的 MIM 结构可以在小角度产生偏振相关的导模共振,这里主要应用了高阶模式以下几个特性: (i) 有效折射率趋近于零,故可在小角度激发; (ii) 模式密度非常高,故可保证小角度范围内有导模分布; (iii) 高阶导模的灵敏度极高,即使微小的双折射特性也会使 TE 和 TM 偏振的共振吸收峰相互错开. 为了能够在实验中激发小角度的导模共振,并进一步观察到增强的 IF 位移效应,设计波导时必须考虑以下几点:

(i) 增加导波层厚度. 虽然这会在一定程度上增加实验中的耦合难度,因为导模的半高全宽随导波层厚度的增加而减少,但同时导模密度会相应增加. 在 MIM 结构中,导模的密度随入射角的减小而减

小,因为增加波导层的厚度会增加小角度范围内出现导模的几率.

(ii) 引入导模耦合的调制,方式可以是波长调制或电光效应调制. 虽然改变入射角也可以实现导模的激发,但在波导结构和波长都已固定的情况下,导模激发的入射角其实已经固定,所以改变入射角并不能达到调制 IF 位移的作用. 相对地,在入射角固定的情况下,改变激发波长或者通过电光效应改变导波层厚度和折射率,可以使导模的共振峰产生移动,进而对 IF 位移的大小起调制作用.

(iii) 为了使 TE 偏振和 TM 偏振在导波层的折射率不同,应该尽量使双折射晶体的光轴与波导表面平行. 这样在接近垂直入射的激发条件下,2种偏振的折射率差值达到最大,分别是 n_0 和 n_e .

下面来看一个具体的实例,假设激光波长为 632.8 nm,对应该波段银的折射率近似为 $\varepsilon_{Ag} = -18.5 + 0.51i$,而铌酸锂晶体的折射率为 $n_0 = 2.232$, $n_e = 2.156$. 使光轴位于入射面内,则可知对应于 TE 偏振,导模的折射率为 $n_0 = 2.232$,而 TM 偏振,导模的折射率约为 $n_e = 2.156$. 为此设计波导参数如下: 其耦合层厚度 h_2 约为 38 nm,而导波层厚度约为 0.55 mm,衬底层厚度为 300 nm. 利用(1)式可以计算2种偏振的反射率谱线如图3所示.

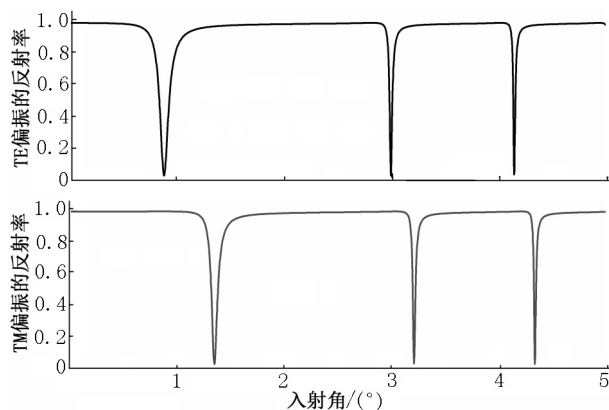


图3 双折射 MIM 波导结构中不同偏振的反射率

由图3可见,由于双折射材料的引入,TE 和 TM 偏振的反射率发生了分离现象,并且可看到上述参数的选择并没有进行任何优化,但依旧存在一个 TE 模式的导模共振所对应的入射角仅为 0.86° ,其对应的增强因子约为 $\cot(0.86^\circ) \approx 66.61$. 理论上,通过调制作用,使导模的共振角度变得更小甚至趋近于零是完全可能的. 从图3可以看到 TM 的反射率约为 0.99,而 TE 的反射率约为 0.004,因此 $|r_p| / |r_s| \approx 16$. 保守估计 IF 位移的增强因子应该超过 900 倍. 下面进行具体的数值模拟.

图4给出了本文设想的一个实际例子,根据(4)式计算所得到的双折射 MIM 结构形成的 IF 位移的数值仿真结果. 仿真的是入射光偏振方向垂直于

入射面的情况,即 IF 位移应该用 $\delta_{r_{\pm}}^V$ 来计算.从图 4 可知,由于偏振分离所带来的反射系数的比值在 TE 模共振时,约为 16;而在 TM 模共振时,该比值趋近于 0.因此在 $0^\circ \sim 3.5^\circ$ 的范围内,一共存在 2 个 $|r_p|/|r_s|$ 的极大值.可进一步看出 IF 位移为什么难以测量,因为此时 $|r_s|/|r_p| \approx 0.004$,该比值几乎不能在实验情况下获得,而此时 IF 位移仅仅获得 1 个数量级的增强.图 4 中关于位相项的模拟说明,在没有发生共振的情况下, $\cos(\varphi_p - \varphi_s)$ 的值约等于 -1,在共振区域,它的数值会接近 1,而与哪一种模式共振无关.最后是 IF 位移,从图 4 可以看出,当 $|r_p|/|r_s|$ 取极大值时,IF 位移都有所增强.在入射角为 3° 左右的 TE 模共振位置,可以获得约 0.03 mm 的 IF 位移,而入射角为 0.86° 的 TE 模共振位置获得的 IF 位移达到 0.1 mm.考虑到左旋光和右旋光的重心向相反方向分开,因此两束光线的分离距离为 0.2 mm.这一结果与利用布儒斯特角在相同波长获得的 IF 位移相比^[12],又增大了 2 个量级.在实验

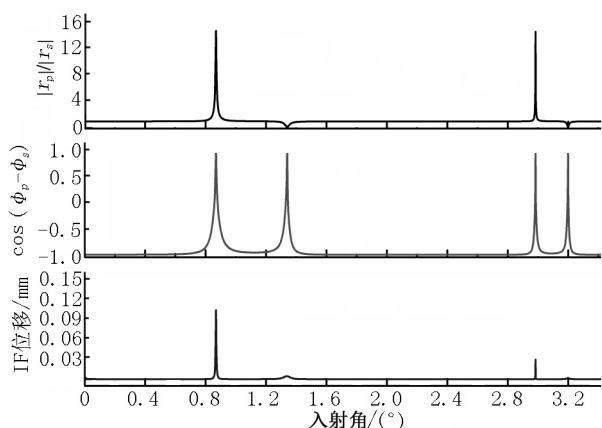


图 4 (上)不同偏振状态的反射系数的比值 $|r_p|/|r_s|$ 随入射角的变化;(中) IF 公式中位相项 $\cos(\varphi_p - \varphi_s)$ 随入射角的变化;(下)数值计算所得到的 IF 位移随入射角的变化

中,如此大的光束分离已不需要采用弱测量手段进行观察就可以看到明显的光斑形变.这里还可以看出 $\cot \theta_i$ 作为增强因子的巨大优势.前面已经提到,在目前的实验条件下已经逼近极限了,进一步增加的空间比较小.而把高阶模共振进一步向小角度移动则完全可能,并且有 $\cot \theta_i \xrightarrow{\theta_i \rightarrow \infty} \infty$.需要强调,在上面仿真的实例中,并没有对结构参数进行特别的优化,若利用电光效应,或者调制入射光的波长,将共振峰向更小角度移动是很容易实现的.仅仅从理论上分析,如果采用优化以后的结构参数,获得毫米量级的 IF 位移是完全可能的,这里不再举实例来说明.

最后需要指出的是,上述设想在理论上是完全可行的,但在实际实验中会遇到一些具体困难,目前最大的困难是 MIM 结构波导的精确加工,这是由于

高阶导模的高灵敏度是一把双刃剑,它过高的灵敏度对加工提出了十分苛刻的要求,数值仿真表明导波层的厚度的加工精度必须达到 10 nm 甚至 1 nm 以上.此外,高阶导模还对整个波导的平行度提出极高的要求,各个界面的不平整度会引发散射,从而导致共振吸收峰的加宽和底部的抬高.因此对实际波导结构来说,在逼近垂直入射的条件下耦合是十分困难的.但有理由相信,随着现在加工工艺的飞速发展,精确加工本文提出的 MIM 波导结构,并且实现毫米量级的 IF 位移是完全可能的.但是在另一方面,由于该结构的小角度共振可以无限地接近垂直入射,因此利用该结构所产生的 IF 位移在理论上是不存在上限的.当然在具体的实验中,反射的光束可能产生非常严重的形变.还需要补充的是,本文虽然以反射光为例,对于透射光也有类似的结论,只需要将 MIM 结构中的金属衬底层的厚度减到与耦合层相同,形成一个完全对称结构即可.

3 总结

本文从 MIM 波导结构和它所支持的高阶模式的特性出发,结合多层介质的光自旋霍尔效应的研究,提出了一种增强 IF 位移到亚毫米尺度的新结构.该结构将双折射晶体作为 MIM 波导的导波层,从而使高阶导模的反射谱线与激发光的偏振状态相关,从而获得 $|r_s|/|r_p|$ 或者 $|r_p|/|r_s|$ 的增强因子;另一方面, MIM 的高阶导模共振可以发生在小角度,这使得该结构具有其它共振结构所没有的另一个增强因子 $\cot \theta_i$,并且上述 2 种增强因子之间是乘积关系.正是基于上述特点,使得 MIM 波导结构在增强 IF 位移方面有着非常诱人的前景,它可以使可见光波段的光束产生 2 个量级以上增强,从而使 IF 位移可以增强到亚毫米甚至毫米量级.如此大的增强可以使 IF 位移不依赖于弱测量手段,而用裸眼直接观察,文中给出的未经优化的实例证实了这一设想.虽然目前在实验上证实该设想还存在加工工艺上的技术障碍,但是相信不久的将来可以攻克这一困难.这一设想的提出,可以极大扩展光自旋霍尔效应的应用前景,在精密度量学、新型光电子器件研发、微纳光子学等领域起到更加重要的作用.

4 参考文献

- [1] Bliokh K Y, Bliokh Y P. Conservation of angular momentum, transverse shift and spin Hall effect in reflection and refraction of an electromagnetic wave packet [J]. Phys Rev Lett 2006, 96(7): 73903.
- [2] Hao Jun, Li Honggen, Yin Cheng, et al. 1.5 mm light

- beam shift arising from 14 pm variation of wavelength [J]. *Journal of the Optical Society of America B* 2010 27 (6): 1305-1308.
- [3] Hosten O, Kwiat P. Observation of the spin hall effect of light via weak measurements [J]. *Science*, 2008, 319 (5864): 787-790.
- [4] Onoda M, Murakami S, Nagaosa N. Hall effect of light [J]. *Phys Rev Lett* 2004 93(8): 83901.
- [5] Bliokh K Y, Aiello A, Goos-hanchen and Imbert-Fedorov beam shifts: An overview [J]. *Journal of Optics* 2012 15 (1): 4001.
- [6] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes [J]. *Phys Rev A*, 1992 45 (11): 8185-8189.
- [7] Lugiato L A, Gatti A, Brambilla E. Quantum imaging [J]. *Journal of Optics B: Quantum and Semiclassical Optics*, 2002 3(4): s176-s183.
- [8] Bliokh K Y, Bliokh Y P. Polarization, transverse shifts and angular momentum conservation laws in partial reflection and refraction of an electromagnetic wave packet [J]. *Phys Rev E* 2007 75(6): 66609.
- [9] Bliokh K Y, Rodriguez-Fortuno F J, Nori F, et al. Spin-orbit interactions of light [J]. *Nature Photon* 2015 9(12): 796-808.
- [10] Aiello A, Banzer P, Neugebauer M, et al. From transverse angular momentum to photonic wheels [J]. *Nature Photon* 2015(12): 789-795.
- [11] Qin Yi, Li Yan, He Huanyu, et al. Measurement of spin Hall effect of reflected light [J]. *Opt Lett* 2009 34(17): 2551-2553.
- [12] Luo Hailu, Zhou Xinxing, Shu Weixing, et al. Enhanced and switchable spin Hall effect of light near the Brewster angle on reflection [J]. *Phys Rev A* 2011 84(4): 1452-1457.
- [13] Gorodetski Y, Niv A, Kleiner V, et al. Observation of the spin-based plasmonic effect in nanoscale structures [J]. *Phys Rev Lett* 2008 101(4): 43903.
- [14] Luo Xiangang, Pu Mingbo, Li Xiong, et al. Broadband spin Hall effect of light in single nanoapertures [J]. *Light Science & Applications* 2017 6(6): e16276.
- [15] Maier S A. *Plasmonics: fundamentals and applications* [M]. New York: Springer 2007: 30-37.
- [16] Dai Hailang, Cao Zhuangqi, Wang Yuxing, et al. Concentric circular grating generated by the patterning trapping of nanoparticles in an optofluidic chip [J]. *Scientific Reports* 2016 6: 32018.
- [17] Xu Tian, Yin Cheng, Kan Xuefen, et al. Drying-mediated optical assembly of silica spheres in a symmetrical metallic waveguide structure [J]. *Optics Letters*, 2017 42(15): 2960-2963.
- [18] Yin Cheng, Lu Yan, Xu Tian, et al. Enhanced Raman scattering based on Fabry-Perot like resonance in a metal-cladding waveguide [J]. *J Raman Spectrosc*, 2016 47: 560-564.
- [19] Li Honggen, Cao Zhuangqi, Lu Haifeng, et al. Free-space coupling of a light beam into a symmetrical metal-cladding optical waveguide [J]. *Appl Phys Lett*, 2003 83(14): 2757-2759.
- [20] Zhou Xingxing, Ling Xiaohui, Luo Hailu, et al. Identifying graphene layers via spin Hall effect of light [J]. *Appl Phys Lett* 2012 101(25): 251602.

The Enhanced Spin Hall Effect of Light Based on Birefringent Metal Insulator Metal Structure

YIN Cheng^{1,3}, WANG Xianping², KAN Xuefen¹, DAI Hailang³, LI Jian¹, HAN Qingbang¹

(1. College of Internet of Things Engineering, Hohai University, Changzhou Jiangsu 213022, China;

2. College of Physics and Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang Jiangxi 330022, China;

3. School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 210094, China)

Abstract: Conventionally, the Imbert-Fedorov shift generated by the spin Hall effect of light is of sub-wavelength scale, which hinders its application in fields such as precision metrology. In this paper, a very simple planar metal/insulator/metal (MIM) structure is proposed, where the insulator layer is made of birefringent material and acts as the guiding layer to support oscillating guided modes. These modes, also known as the high order modes, can be directly excited via the free space coupling technology. The key factor is that resonance may occur at very small incident angle, even approaches normal incidence. On the other hand, the induced birefringence will result in mode splitting, so that the reflectivity spectrum of the waveguide structure is no longer mode independent. Combined the two factors mentioned above, the IF shift of this simple structure can be significantly enhanced, and theoretical estimated value can approach sub-millimeter or millimeter scale, which is possible to be observed by naked eyes.

Key words: spin Hall effect of light; MIM structure; transversal IF shift

(责任编辑: 冉小晓)