

基于合金介电常数的可控特性增强光子自旋霍尔效应

万婷 罗朝明 闵力 陈敏 肖磊

Enhanced photonic spin Hall effect due to controllable permittivity of alloy film

Wan Ting Luo Zhao-Ming Min Li Chen Min Xiao Lei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 064201 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20171824

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171824>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I6>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于合金介电常数的可控特性增强光子自旋霍尔效应](#)

Enhanced photonic spin Hall effect due to controllable permittivity of alloy film

物理学报.2018, 67(6): 064201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171824>

[偏振双向衰减对光学成像系统像质影响的矢量平面波谱理论分析](#)

Analysis of the influence of diattenuation on optical imaging system by using the theory of vector plane wave spectrum

物理学报.2017, 66(8): 084202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.084202>

[一种含时贝塞尔光束的理论性质研究](#)

Theoretical investigation on a kind of time-dependent Bessel beam

物理学报.2016, 65(14): 144201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.144201>

[角向偏振无衍射光束的传输特性及其偏振态研究](#)

Polarization and propagation characteristics of the azimuthally polarized non-diffracting beam

物理学报.2015, 64(6): 064201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.064201>

[高阶邦加球上柱矢量光束的变换](#)

Conversion of cylindrical vector beams on the higher-order Poincaré sphere

物理学报.2014, 63(15): 154203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.154203>

# 基于合金介电常数的可控特性增强光子自旋霍尔效应\*

万婷<sup>1)</sup> 罗朝明<sup>1)†</sup> 闵力<sup>2)</sup> 陈敏<sup>1)</sup> 肖磊<sup>1)</sup>

1)(湖南理工学院信息与通信工程学院, 岳阳 414006)

2)(湖南理工学院物理与电子学院, 岳阳 414006)

(2017年8月12日收到; 2017年11月20日收到修改稿)

基于平面角谱理论, 系统研究了BK7玻璃-合金薄膜-空气结构中合金介电常数的变化对反射光自旋霍尔效应的调控规律. 数值仿真结果表明, 该结构发生表面等离激元共振的共振角主要受合金介电常数实部的影响, 随介电常数实部的增加而增大, 而虚部对共振角变化的影响相对较小. 不同介电常数合金在其共振角处得到的较大光子自旋霍尔效应横移呈集中的带状分布, 选取介电常数  $-2.8 + 1.6i$  的 Ag-Ni 合金时, 光子自旋霍尔效应横移能达到  $1.2 \times 10^5$  nm. 研究还发现将入射角固定为  $44.1^\circ$  时, 光子自旋霍尔效应横移随合金介电常数的变化呈轴对称分布, 并以最大值为中心呈球面状辐射, 离中心点越远光子自旋霍尔效应横移越小. 选取介电常数  $-10.6 + 1.2i$  的 Ag-Au 合金时, 光子自旋霍尔效应横移最大能达到 8000 nm, 相比于以往纯金属纳米结构 BK7 玻璃-金-空气中得到的最大光子自旋霍尔效应横移 3000 nm 有了较大的提高. 该研究不仅能够有效增强光子自旋霍尔效应, 还能为设计等离激元共振传感器等纳米光子器件提供理论依据.

**关键词:** 光子自旋霍尔效应, 表面等离激元共振, 合金介电常数

**PACS:** 42.25.-p, 42.25.Bs, 42.79.-e, 78.20.Bh

**DOI:** 10.7498/aps.67.20171824

## 1 引言

光子自旋霍尔效应是一种有趣的光束传输现象, 当光束经过非均匀介质时, 由于光子的自旋-轨道相互作用在垂直于入射面的方向会发生光束横向分离, 造成光束自旋分裂的现象<sup>[1-5]</sup>. 它是一种类似于电子自旋霍尔效应的现象, 其中光子和折射率梯度分别扮演着类似于电子和外加电场的作用. 自2004年该现象理论被提出后吸引了许多研究者的兴趣, 人们对不同物理系统中的光子自旋霍尔效应进行了研究, 如高能物理<sup>[6,7]</sup>、半导体物理<sup>[8,9]</sup>、超材料<sup>[10-13]</sup>、光学物理<sup>[14-16]</sup>等. 然而光子自旋霍尔效应是一种非常弱的效应, 产生的光子自旋霍尔效应横移通常只有几十甚至几百纳米, 需要借助

弱测量技术才能间接观测<sup>[17]</sup>.

人们一直在寻找有效的方法来增强光子自旋霍尔效应. 研究者发现: 在布鲁斯特角附近能观测到大的光子自旋霍尔效应横移<sup>[18,19]</sup>; 不含金属的多层薄膜结构<sup>[20,21]</sup>、超表面<sup>[13,22,23]</sup>也能很好地增强光子自旋霍尔效应. 最近的研究发现, 含金属的多层纳米结构能够极大地增强光子自旋霍尔效应<sup>[24,25]</sup>, Zhou和Ling<sup>[25]</sup>利用BK7玻璃-金-空气结构激发表面等离共振(surface plasmon resonance, SPR)使光子自旋霍尔效应横移达到了3000 nm. 然而该结构中使用的金属为纯金属, 介电常数取值有限, 而将纯金属以不同比例混合成合金可实现介电常数的人为调控, 从而能够更好地操纵SPR. Yang等<sup>[26]</sup>利用银铜合金来调节介电常

\* 湖南省教育厅科学研究优秀青年项目(批准号: 17B114)、国家自然科学基金(批准号: 11647110)、湖南省自然科学基金(批准号: 2017JJ3098, 2016JJ2064)和湖南省科技计划项目(批准号: 2016TP1021)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhaomingluo@hnu.edu.cn

数从而实现表面等离激元器件性能的优化. 张喆等<sup>[27]</sup>利用金银合金设计了近红外SPR传感器, 较大地提高了传感器的灵敏度. 因此, 我们相信采用含合金的表面等离激元结构有望进一步增强光子自旋霍尔效应.

本文系统研究了BK7玻璃-合金薄膜-空气结构中合金介电常数的变化对光子自旋霍尔效应的影响规律, 从而找到增强光子自旋霍尔效应的新途径. 首先从平面角谱理论出发, 建立高斯光束在BK7玻璃-合金薄膜-空气结构中反射光的光子自旋霍尔效应模型, 进而得到反射光场中的光子自旋霍尔效应横移表达式. 然后探索合金介电常数的变化对光子自旋霍尔效应的影响规律, 找到实现光子自旋霍尔效应增强的方法.

## 2 结构模型与理论

图1为光束经过BK7玻璃-合金薄膜-空气结构的反射光自旋霍尔效应模型, BK7玻璃(BK7)、合金薄膜(alloy film)和空气(air)的介电常数分别为 $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_0$ . 图中 $xyz$ 为实验室坐标系,  $z$ 轴垂直于分界面,  $x_i y_i z_i$ 和 $x_r y_r z_r$ 分别表示入射坐标系和反射坐标系. 光束以入射角 $\theta$ 沿 $z_i$ 方向入射到BK7玻璃-合金薄膜-空气结构, 在 $z = 0$  (BK7玻璃与合金薄膜界面)处沿 $z_r$ 方向反射时, 由于光子自旋霍尔效应的作用, 反射光束在垂直于入射面的方向发生横向分裂,  $\Delta y_+$ 和 $\Delta y_-$ 分别表示左、右旋圆偏振分量的横移. 采用高斯光束作为入射, 其角谱表达式为

$$\begin{aligned} \tilde{E}_i(k_{ix}, k_{iy}) \\ = \frac{w_0}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{w_0^2(k_{ix}^2 + k_{iy}^2)}{4}\right], \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $w_0$ 为光束的束腰宽度;  $k_{ix}$ ,  $k_{iy}$ 分别表示入射光束的波矢在 $x_i$ ,  $y_i$ 方向上的分量. 将任意角谱的高斯光束做傅里叶变换可以得到其电场表达式

$$\begin{aligned} E_a(x_a, y_a, z_a) \\ = \iint dk_{ax} dk_{ay} \tilde{E}_a(k_{ax}, k_{ay}) \\ \times \exp[i(k_{ax}x_a + k_{ay}y_a + k_{az}z_a)], \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $E_a(x_a, y_a, z_a)$ 表示不同光束的电场, 其中 $a = i, r$ 分别表示入射光和反射光;  $k_{ax}, k_{ay}, k_{az}$

分别为入射光或反射光束的波矢 $\mathbf{k}_a$ 在 $x_a, y_a, z_a$ 方向上的分量,  $k_{az} = \sqrt{k_a^2 - (k_{ax}^2 + k_{ay}^2)}$ . 将 $k_{az}$ 使用泰勒展开化简, 并取前两项再代入(2)式可得

$$\begin{aligned} E_a(x_a, y_a, z_a) \\ = \exp(ik_{az}z_a) \iint dk_{ax} dk_{ay} \tilde{E}_a(k_{ax}, k_{ay}) \\ \times \exp\left[i\left(k_{ax}x_a + k_{ay}y_a - \frac{k_{ax}^2 + k_{ay}^2}{2k_a}z_a\right)\right]. \end{aligned} \quad (3)$$

由电场边界连续性条件得到反射场角谱与入射场角谱的关系式为<sup>[20,25]</sup>

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \tilde{E}_r^H \\ \tilde{E}_r^V \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} r_p & \frac{k_{ry}(r_p + r_s) \cot \theta}{k_0} \\ -\frac{k_{ry}(r_p + r_s) \cot \theta}{k_0} & r_s \end{bmatrix} \\ &\times \begin{bmatrix} \tilde{E}_i^H \\ \tilde{E}_i^V \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $\tilde{E}_r^H, \tilde{E}_r^V$ 分别表示反射光中水平偏振分量和垂直偏振分量的角谱;  $\tilde{E}_i^H, \tilde{E}_i^V$ 分别为入射光中水平偏振分量和垂直偏振分量的角谱;  $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空中的波数,  $\lambda$ 为入射光的波长;  $r_p$ 和 $r_s$ 分别表示p偏振光与s偏振光的菲涅耳反射系数. 图1所示结构的菲涅耳反射系数可通过下式求解得到<sup>[25]</sup>:

$$r_A = \frac{R_A + R'_A \exp(2ik_0 \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \theta} d)}{1 + R_A R'_A \exp(2ik_0 \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \theta} d)}, \quad (5)$$

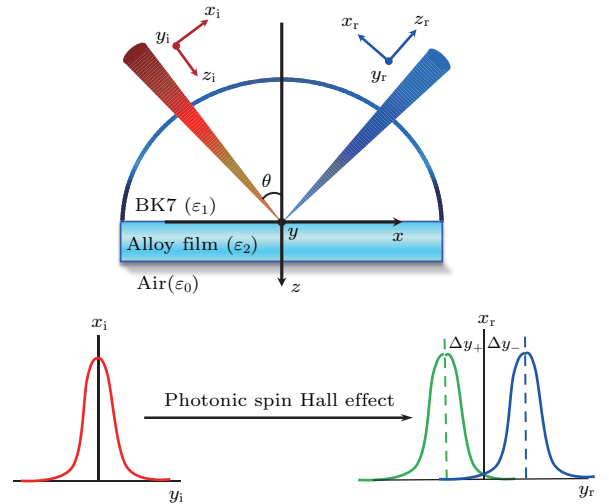


图1 入射光通过BK7玻璃-合金薄膜-空气结构的反射光自旋霍尔效应模型

Fig. 1. Schematic of the photonic spin Hall effect in a nanoalloy structure composed of BK7 glass, alloy film, and air.

这里  $A = p, s$ ;  $R_A$  为 BK7 玻璃与合金薄膜界面的菲涅耳反射系数, 可由下式表示 [28,29]

$$R_p = \frac{\varepsilon_2 \cos \theta - \sqrt{\varepsilon_1} \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \theta}}{\varepsilon_2 \cos \theta + \sqrt{\varepsilon_1} \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \theta}}, \quad (6)$$

$$R_s = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} \cos \theta - \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \theta}}{\sqrt{\varepsilon_1} \cos \theta + \sqrt{\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \sin^2 \theta}}. \quad (7)$$

同理, 合金薄膜与空气界面的菲涅耳反射系数  $R'_A$  也可用类似的方法表示. 已知任意的线偏振光可以分解为左旋圆与右旋圆偏振光束的叠加, 则水平偏振和垂直偏振对应的角谱表达式可分解为

$$\tilde{E}_a^H = \frac{1}{\sqrt{2}}(\tilde{E}_{a+} + \tilde{E}_{a-}), \quad (8)$$

$$\tilde{E}_a^V = \frac{1}{\sqrt{2}}i(\tilde{E}_{a-} - \tilde{E}_{a+}), \quad (9)$$

式中,  $\tilde{E}_{a+}$  和  $\tilde{E}_{a-}$  分别表示左旋圆偏振和右旋圆偏振分量. 根据 (4), (8) 和 (9) 式, 反射光的角谱表达式可写为

$$\tilde{E}_r^H = \frac{r_p}{\sqrt{2}}[\exp(+ik_{ry}\delta_r^H)\tilde{E}_{r+} + \exp(-ik_{ry}\delta_r^H)\tilde{E}_{r-}], \quad (10)$$

$$\tilde{E}_r^V = \frac{ir_s}{\sqrt{2}}[-\exp(+ik_{ry}\delta_r^V)\tilde{E}_{r+} + \exp(-ik_{ry}\delta_r^V)\tilde{E}_{r-}], \quad (11)$$

其中  $\delta_r^H = (1 + r_s/r_p) \cot \theta / k_0$ ,  $\delta_r^V = (1 + r_p/r_s) \cot \theta / k_0$ . 当光束的传输距离  $z_r$  为常量时, 任意一束光束的质心横移可以表示为 [20]

$$\Delta y_{\pm} = \frac{\iint y_r I(x_r, y_r, z_r) dx_r dy_r}{\iint I(x_r, y_r, z_r) dx_r dy_r}, \quad (12)$$

式中  $I(x_r, y_r, z_r) \propto \mathbf{S}_r \cdot \mathbf{e}_{rz}$ , 即电场强度的分布与坡印廷矢量成正比, 坡印廷矢量  $\mathbf{S}_r \propto \text{Re}[\mathbf{E}_r^* \times \mathbf{H}_r]$ , 其中磁场强度  $\mathbf{H}_r = -ik_r^{-1} \nabla \times \mathbf{E}_r$ ,  $\mathbf{E}_r$  为电场强度. 通过进一步化简, 反射光的质心横移表达式可写为

$$\Delta y_{\pm}^H = \mp \frac{\lambda}{2\pi} \left[ 1 + \frac{|r_s|}{|r_p|} \cos(\varphi_s - \varphi_p) \right] \cot \theta, \quad (13)$$

$$\Delta y_{\pm}^V = \mp \frac{\lambda}{2\pi} \left[ 1 + \frac{|r_p|}{|r_s|} \cos(\varphi_p - \varphi_s) \right] \cot \theta, \quad (14)$$

这里  $r_{p,s} = |r_{p,s}| \exp(i\varphi_{p,s})$ ,  $|r_{p,s}|$  表示菲涅耳反射系数的模值,  $\varphi_{p,s}$  表示菲涅耳反射系数的相角.

### 3 数值模拟与分析

本节将依据已建立的反射光自旋霍尔效应模型, 研究如图 1 所示的 BK7 玻璃-合金薄膜-空气结

构中合金介电常数的变化对光子自旋霍尔效应的影响规律, 进而找出能够实现光子自旋霍尔效应增强的合金介电常数. 在这部分的仿真分析中选取参数如下 [20,25]: 入射光的波长  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ , BK7 玻璃的介电常数  $\varepsilon_1 = 2.295$ , 空气的介电常数  $\varepsilon_0 = 1$ , 合金介电常数  $\varepsilon_2 = \varepsilon_r + i\varepsilon_i$ , 其中  $\varepsilon_r, \varepsilon_i$  分别为合金介电常数的实部和虚部, 合金厚度  $d = 50 \text{ nm}$ . 由前人的研究 [25,29] 可知, 当光束入射到该结构时 p 偏振菲涅耳反射系数会随着入射角的变化发生急剧下降, 进而使垂直偏振与水平偏振的菲涅耳反射系数之比迅速增大, 相应的光子自旋霍尔效应横移也急剧增加. 究其原因是当光束入射到金属薄膜表面时自由电子和光子相互作用发生 SPR 现象的结果. 将 p 偏振菲涅耳反射系数最小值对应的入射角称为 SPR 的共振角, 该共振角处的光子自旋霍尔效应横移值为极大值. 同时还需要说明的是 SPR 可由 H 偏振光激发, 而 V 偏振光几乎不能激发, 故本文只对 H 偏振情况下的光子自旋霍尔效应进行讨论.

为了实现共振角处光子自旋霍尔效应的调控, 首先研究了合金介电常数的变化对 SPR 的共振角的影响规律. 参照文献 [25, 29] 求出不同合金介电常数  $\varepsilon_2$  对应的 SPR 的共振角, 并在此基础上给出 SPR 的共振角随合金介电常数实部  $\varepsilon_r$  和虚部  $\varepsilon_i$  变化的二维伪彩色图, 如图 2 所示, 这里的伪彩色图像的亮度表示 SPR 的共振角大小. 在这里我们设定合金介电常数实部在  $-12 \sim -2$ 、虚部在  $0 \sim 2.4$  范

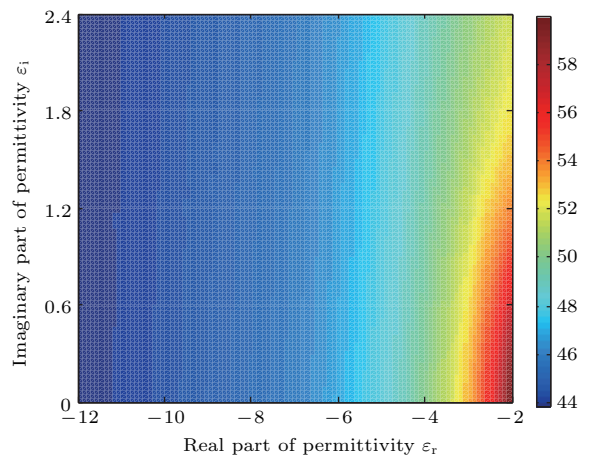


图 2 SPR 的共振角随合金介电常数变化的二维伪彩色图 (单位:  $^\circ$ )

Fig. 2. Pseudo-color diagram of the SPR resonant angles changing with the permittivities of alloy film (unit:  $^\circ$ ).

围内变化,从图2可看出其对应的共振角大约在 $44^\circ-62^\circ$ 之间,而且SPR的共振角主要受合金介电常数实部的影响,相比而言虚部对共振角的变化影响较小.当合金介电常数虚部 $\epsilon_i$ 一定时,共振角随着合金介电常数实部的增加而增大.下面选取3个不同介电常数 $\epsilon_2 = -7.0 + 0.2i, -5.0 + 0.2i, -5.0 + 2.2i$ 进行数值论证,各合金介电常数对应的共振角分别为 $46.0^\circ, 48.2^\circ, 47.7^\circ$ .由此可以看出当实部变化2个单位时共振角变化了 $2.2^\circ$ ,虚部变化2个单位时共振角仅变化了 $0.5^\circ$ .表明合金介电常数虚部相对于实部对共振角的影响较小.

在上述研究基础上,进一步探索合金介电常数的变化对其共振角处光子自旋霍尔效应的影响规律.将图2所示的每一对合金介电常数对应的SPR的共振角作为入射角,数值模拟该共振角处光子自旋霍尔效应横移随合金介电常数 $\epsilon_r, \epsilon_i$ 的变化,得到的伪彩色图如图3所示,亮度表示光子自旋霍尔效应横移的大小,单位为nm.由图3可以看出,改变合金介电常数 $\epsilon_r, \epsilon_i$ 能够实现大范围内光子自旋霍尔效应横移的调控,并且共振角处较大的光子自旋霍尔效应横移随合金介电常数的变化比较集中,呈带状分布.研究还发现最大的光子自旋霍尔效应横移对应的合金介电常数为 $\epsilon_2 = -2.8 + 1.6i$ ,由Bruggerman理论可知,这一介电常数可以使用金属Ni, Ag混合得到[30,31]在此结构参数条件下,我们也计算出光子自旋霍尔效应横移随入射角 $\theta$ 的变化关系,结果如图4所示,可以明显看出在共振角为 $51.5^\circ$ 时光子自旋霍尔效应横移最大达到 $1.2 \times 10^5$  nm,这约为文献[25]中纯金属纳米结构BK7玻璃-金-空气中得到的光子自旋霍尔效应横移的40倍.产生这种光子自旋霍尔效应增强现象的内在物理机理仍然是光子的自旋角动量和轨道角动量的耦合作用[2,17,32],(10)和(11)式中的 $\exp(\pm ik_{ry}\delta_r^{H,V})$ 项就体现了这一耦合,且其随着 $|r_s|/|r_p|$ 比值的增大而增大.为了更加清楚地体现介电常数对光子自旋霍尔效应的调控作用,我们选取最大横移对应的合金介电常数 $\epsilon_2 = -2.8 + 1.6i$ 和文献[25]中纯金属金的介电常数 $\epsilon_2 = -10.4 + 1.4i$ 这两种情形,分别得到了它们的菲涅耳反射系数随入射角 $\theta$ 的变化关系,结果如图5所示.从图5可以清楚地看出,合金结构在其共振角处的菲涅耳反射系数比值 $|r_s|/|r_p|$ 远大于纯金属结构的比值,所选取的合金结构与文献[25]采

用的纯金属结构相比能够获得更大的光子自旋霍尔效应横移.

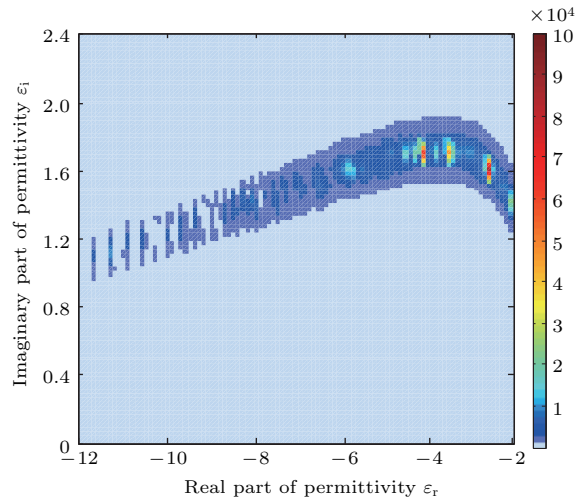


图3 共振角处光子自旋霍尔效应横移随合金介电常数变化的伪彩色图(单位 nm)

Fig. 3. Pseudo-color diagram of the spin-dependent splitting as a function of the permittivities of alloy film at the resonant angle (unit: nm).

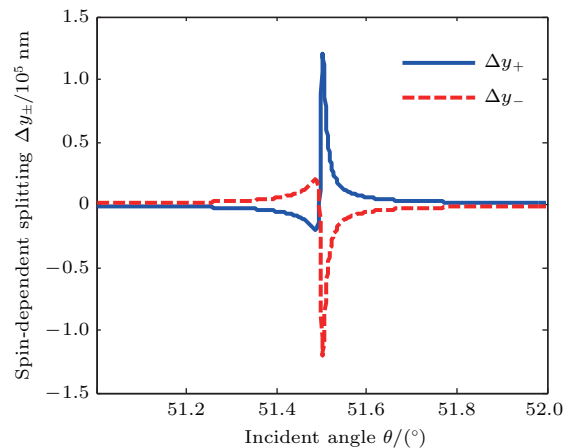


图4 合金介电常数为 $\epsilon_2 = -2.8 + 1.6i$ 时光子自旋霍尔效应横移随入射角的变化

Fig. 4. The spin-dependent splitting varying with the incident angles under the condition of permittivity  $\epsilon_2 = -2.8 + 1.6i$ .

最后保持入射角度恒定不变,探索合金介电常数在该角度处光子自旋霍尔效应的调控规律.为了便于比较,我们将入射角设定为文献[25]中的最优入射角 $\theta = 44.1^\circ$ ,得到该角度下光子自旋霍尔效应横移随合金介电常数 $\epsilon_r, \epsilon_i$ 的伪彩色图,结果如图6所示,图中色度表示光子自旋霍尔效应横移的大小,单位为nm.由图6可以看出入射角固定为某一定值时光子自旋霍尔效应横移随介电常数 $\epsilon_r, \epsilon_i$

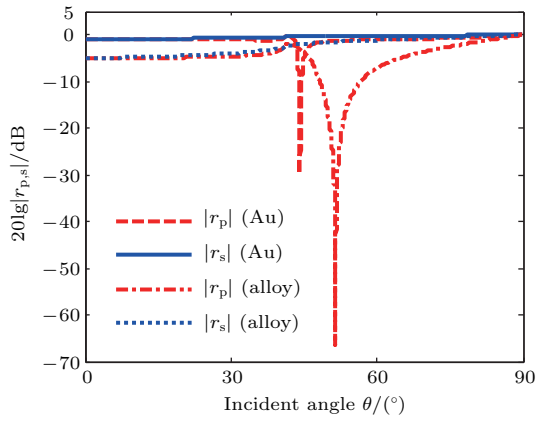


图5 合金纳米结构 ( $\epsilon_2 = -2.8 + 1.6i$ ) 和纯金属纳米结构 ( $\epsilon_2 = -10.4 + 1.4i$ ) 的非涅耳反射系数随入射角的变化

Fig. 5. The Fresnel reflection coefficients changing with the incident angle for a nanoalloy structure ( $\epsilon_2 = -2.8 + 1.6i$ ) and a pure nanometal structure ( $\epsilon_2 = -10.4 + 1.4i$ ).

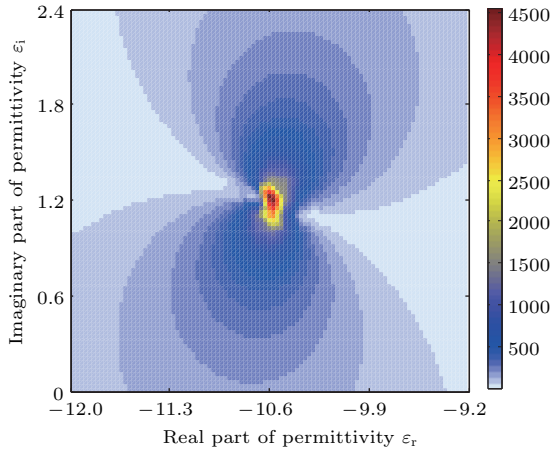


图6 光子自旋霍尔效应横移随合金介电常数变化的伪彩色图(单位 nm)

Fig. 6. Pseudo-color diagram of the spin-dependent splitting varying with the permittivities of alloy film (unit: nm).

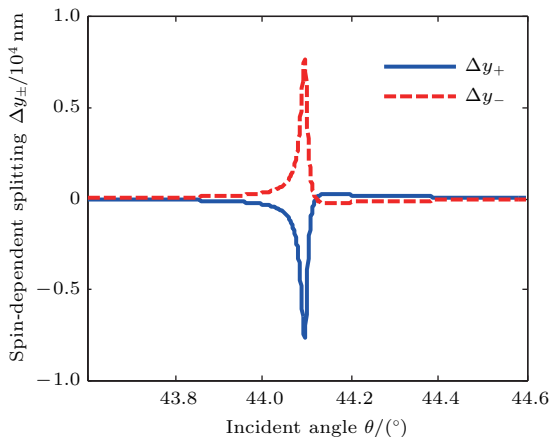


图7 合金介电常数  $\epsilon_2 = -10.6 + 1.2i$  时光子自旋霍尔效应横移随入射角的变化

Fig. 7. The spin-dependent splitting varying with the incident angle under the condition of permittivity  $\epsilon_2 = -10.6 + 1.2i$ .

呈轴对称分布, 并以最大值为中心呈球面状辐射, 离中心点越远光子自旋霍尔效应横移越小. 进一步观察发现该中心点对应的介电常数  $\epsilon_2 = -10.6 + 1.2i$ , 由Bruggeman理论可知这一介电常数可通过 Au 和 Ag 复合制得 [30,31]. 同时给出了该介电常数下光子自旋霍尔效应横移随入射角  $\theta$  的变化关系, 结果如图 7 所示, 可以看出此时光子自旋霍尔效应横移最大达到 8000 nm, 与文献 [25] 中最大光子自旋霍尔效应横移值 3000 nm 相比有了较大的提高. 由此可得出当入射角相同时调节合金介电常数能够进一步增强光子自旋霍尔效应.

## 4 结 论

本文基于平面角谱理论建立了光束经过 BK7 玻璃-合金薄膜-空气结构的反射光自旋霍尔效应模型, 系统研究了合金介电常数的变化对光子自旋霍尔效应的影响, 找到了实现光子自旋霍尔效应增强的合金介电常数. 研究发现, SPR 共振角主要受合金介电常数实部的影响, 随着实部的增加而增大, 相比而言虚部对共振角的影响较小. 当入射角为共振角时, 较大的光子自旋霍尔效应横移随合金介电常数的变化比较集中, 呈带状分布. 选取介电常数  $-2.8 + 1.6i$  的 Ag-Ni 合金时得到最大横移  $1.2 \times 10^5$  nm, 这约为纯金属的纳米结构 BK7 玻璃-金-空气中得到的光子自旋霍尔效应横移的 40 倍. 当入射角固定为  $44.1^\circ$  时, 光子自旋霍尔效应横移随介电常数的变化呈轴对称分布, 并以最大值为中心呈球面状辐射, 离中心点越远光子自旋霍尔效应横移越小. 选取介电常数  $-10.6 + 1.2i$  的 Ag-Au 合金时, 最大的光子自旋霍尔效应横移能达到 8000 nm, 相比于以往 BK7 玻璃-金-空气中得到的横移 3000 nm 也有了较大的提高. 综上所述, 合适地选取合金介电常数, 可以有效地增强光子自旋霍尔效应, 这些研究结果可以为研制 SPR 传感器等新型光学纳米器件提供理论依据.

## 参考文献

- [1] Onoda M, Murakami S, Nagaosa N 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 083901
- [2] Bliokh K Y, Bliokh Y P 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 073903
- [3] Hermosa N, Nugrowati A M, Aiello A, Woerdman J P 2011 *Opt. Lett.* **36** 3200

- [4] Gorodetski Y, Bliokh K Y, Stein B, Genet C, Shitrit N, Kleiner V, Hasman E, Ebbesen T W 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 013901
- [5] Ling X H, Zhou X X, Huang K, Liu Y C, Qiu C W, Luo H L, Wen S C 2017 *Rep. Prog. Phys.* **80** 066401
- [6] Gosselin P, Bérard A, Mohrbach H 2007 *Phys. Rev. D* **75** 084035
- [7] Dartora C A, Cabrera G G, Nobrega K Z, Montagner V F, Matielli M H K, de Campos F K R, Filho H T S 2011 *Phys. Rev. A* **83** 012110
- [8] Ménard J M, Mattacchione A E, van Driel H M, Hautmann C, Betz M 2010 *Phys. Rev. B* **82** 045303
- [9] Alizadeh M H, Reinhard B M 2016 *Opt. Express* **24** 8471
- [10] Lee Y U, Wu J W 2015 *Sci. Rep.* **5** 13900
- [11] Yi X N, Li Y, Liu Y C, Ling X H, Zhang Z Y, Luo H L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 094203 (in Chinese) [易煦农, 李瑛, 刘亚超, 凌晓辉, 张志友, 罗海陆 2014 物理学报 **63** 094203]
- [12] Chen M, Luo Z M, Wan T, Liu J 2017 *Acta Opt. Sin.* **37** 0226002 (in Chinese) [陈敏, 罗朝明, 万婷, 刘靖 2017 光学学报 **37** 0226002]
- [13] Liu Y C, Ke Y G, Luo H L, Wen S C 2017 *Nanophotonics* **6** 51
- [14] Luo Z M, Chen S Z, Ling X H, Zhang J, Luo H L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 154203 (in Chinese) [罗朝明, 陈世祯, 凌晓辉, 张进, 罗海陆 2014 物理学报 **63** 154203]
- [15] Qin Y, Li Y, He H Y, Gong Q H 2009 *Opt. Lett.* **34** 2551
- [16] Neugebauer M, Grosche S, Rothau S, Leuchs G, Banzer P 2016 *Opt. Lett.* **41** 3499
- [17] Hosten O, Kwiat P 2008 *Science* **319** 787
- [18] Luo H L, Zhou X X, Shu W X, Wen S C, Fan D Y 2011 *Phys. Rev. A* **84** 043806
- [19] Qiu X D, Zhang Z Y, Xie L G, Qiu J D, Gao F H, Du J L 2015 *Opt. Lett.* **40** 1018
- [20] Luo H L, Ling X H, Zhou X X, Shu W X, Wen S C, Fan D Y 2011 *Phys. Rev. A* **84** 033801
- [21] Wang B, Li Y, Pan M M, Ren J L, Xiao Y F, Yang H, Gong Q H 2013 *Phys. Rev. A* **88** 043842
- [22] Tang T T, Li C Y, Luo L 2016 *Sci. Rep.* **6** 30762
- [23] Ling X H, Zhou X X, Yi X N, Shu W X, Liu Y C, Chen S Z, Luo H L, Wen S C, Fan D Y 2015 *Light Sci. Appl.* **4** e290
- [24] Zhou X X, Xiao Z C, Luo H L, Wen S C 2012 *Phys. Rev. A* **85** 043809
- [25] Zhou X X, Ling X H 2016 *IEEE Photon. J.* **8** 4801108
- [26] Yang G, Fu X J, Zhou J 2013 *J. Opt. Soc. Am. B* **30** 282
- [27] Zhang Z, Liu Q, Qi Z M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 060703 (in Chinese) [张喆, 柳倩, 祁志美 2013 物理学报 **62** 060703]
- [28] Born M, Wolf E 1999 *Principles of Optics* (Cambridge: Cambridge University Press) pp38–44
- [29] Salasnich L 2012 *Phys. Rev. A* **86** 055801
- [30] Berthault A, Rousselle D, Zerah G 1992 *J. Magn. Magn. Mater.* **112** 477
- [31] Jiang J J, Li D, Geng D Y, An J, He J, Liu W, Zhang Z D 2014 *Nanoscale* **6** 3967
- [32] Bliokh K Y, Niv A, Kleiner V, Hasman E 2008 *Nat. Photon.* **2** 748

# Enhanced photonic spin Hall effect due to controllable permittivity of alloy film\*

Wan Ting<sup>1)</sup> Luo Zhao-Ming<sup>1)†</sup> Min Li<sup>2)</sup> Chen Min<sup>1)</sup> Xiao Lei<sup>1)</sup>

1) (School of Information and Communication Engineering, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China)

2) (School of Physics and Electronic, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China)

( Received 12 August 2017; revised manuscript received 20 November 2017 )

## Abstract

Photonic spin Hall effect (SHE) is an interesting transport phenomenon, and has attracted growing attention. The spin-dependent splitting of photonic SHE as a weak effect is just tens of nanometers so that it can usually be detected indirectly with the weak measurement techniques. To detect it directly and use it properly, many efforts have been devoted to enhancing the photonic SHE. Recently, the surface plasmon resonance (SPR) excited by a pure nanometal structure is used to enhance the photonic SHE. However, the pure metal permittivities are limited, therefore the regulation of the photonic SHE is also restricted. It is worth mentioning that the alloy made from the pure metal with different composition proportions can achieve the artificial control of permittivity. More importantly, the alloy can also be used to manipulate the SPR. In this paper, we systematically investigate the photonic SHE in a nanoalloy structure composed of BK7 glass, alloy film and air in order to realize the enhancement of photonic SHE. First of all, the resonant angle of SPR varying with the permittivity of alloy is studied by using the angular spectrum theory of beam. It is found that the resonant angle of the SPR is mainly influenced by the real part of the permittivity of alloy, while the imaginary part has little influence on it. The resonant angle of SPR will increase with the increase of the real part of the permittivity. Secondly, the spin-dependent splitting is studied by changing the alloy permittivity when the incident angle is set to be a resonant angle. We find that the distribution of the larger spin-dependent splitting at the resonant angle is zonal. The optimal permittivity of alloy film is  $\varepsilon_2 = -2.8 + 1.6i$ , and the alloy can be composed of Ag and Ni according to the Bruggeman theory. Under the condition of the optimal permittivity, the spin-dependent splitting reaches about  $1.2 \times 10^5$  nm at a resonant angle of  $51.5^\circ$ , which is about 40 times larger than the previous result in a pure nanometal structure. Finally, when the incident angle is fixed at  $44.1^\circ$ , it is revealed that the spin-dependent splitting varying with the permittivity is axially symmetric and spherical radiation is centered at a maximum value. The farther away from the center, the smaller the corresponding beam shift is. The alloy permittivity in the spherical radiation center is  $\varepsilon_2 = -10.6 + 1.2i$ , which can be composed of Au and Ag. The value of spin-dependent splitting reaches about 8000 nm, which is greatly improved when compared with the previous maximum value 3000 nm in a pure nanometal structure. These findings can effectively enhance the photonic SHE and provide theoretical basis for the research and development of nanophotonic devices such as the SPR-based sensor.

**Keywords:** photonic spin Hall effect, surface plasmon resonance, permittivity of alloy film

**PACS:** 42.25.-p, 42.25.Bs, 42.79.-e, 78.20.Bh

**DOI:** 10.7498/aps.67.20171824

\* Project supported by the Scientific Research Youth Project of Hunan Provincial Education Department, China (Grant No. 17B114), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11647110), the Natural Science Foundation of Hunan Province, China (Grant Nos. 2017JJ3098, 2016JJ2064), and the Science and Technology Program of Hunan Province, China (Grant No. 2016TP1021).

† Corresponding author. E-mail: zhaomingluo@hnu.edu.cn