

布儒斯特角入射的高斯光束传输特性研究

叶俏珏, 王先菊*, 戴占海

华南农业大学电子工程学院, 广东 广州 510642

摘要 相比于普通光源, 高斯光束具有很好的方向性, 而且应用范围十分广泛, 采用 COMSOL 多物理场仿真软件对以布儒斯特角入射的高斯光束的传输特性进行研究。仿真结果表明, s 偏振情况下, 折射光束为高斯光束, 反射光束的方向与折射光束互相垂直; p 偏振情况下, 折射光束为高斯光束, 反射光束不存在, 但反射界面的电场模量出现中心强度显著抑制的双瓣剖面, 而且出现很弱的双峰反射; 在不同的折射率下, 折射介质的折射率越大, 折射光束的强度集中范围越窄, 折射光束的能量越来越低, 折射光束与入射光束的电场模量差越小。

关键词 光计算; 高斯光束; 布儒斯特角; 反射折射定律; 光束特性

中图分类号 O435

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0720001

Study on Propagation Characteristics of Gaussian Beam Incident at Brewster Angle

Ye Qiaojue, Wang Xianju*, Dai Zhanhai

College of Electronics Engineering, College of Artificial Intelligence,
South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China

Abstract Compared with ordinary light sources, Gaussian beams have good directivity and have a wide range of applications. COMSOL multiphysics simulation software is used to study the propagation characteristics of Gaussian beams incident at Brewster angle. The simulation results show that under s polarization, the refracted beam is a Gaussian beam, and the direction of the reflected beam is perpendicular to the refracted beam; under p polarization, the refracted beam is a Gaussian beam, and the reflected beam does not exist, but the electric field modulus at the reflection interface shows a double-lobe profile with significantly reduced central intensity and very weak bimodal reflection. Under the different refractive index, the larger the refractive index of the refractive medium, the narrower the intensity concentration range of the refracted beam, the lower the energy, and the smaller the electric field modulus difference between the refracted beam and the incident beam.

Key words optics in computing; Gaussian beam; Brewster angle; law of reflection and refraction; beam characteristics

OCIS codes 200.1130; 010.3310; 120.5700; 120.5710

1 引言

根据菲涅耳反射原理可知, p 偏振光和 s 偏振光的透射率和反射率均存在差异, 当入射光以布儒斯

特角入射到界面时, p 偏振光只有反射光线并垂直于折射光线, 故使其具有很强的实用价值和可操作性。Chen 团队^[1]基于太赫兹调制方法并使用石墨烯介质得到可调的布儒斯特角, 进而开发了一种超

收稿日期: 2020-08-12; 修回日期: 2020-08-24; 录用日期: 2020-09-10

基金项目: 广东省省级科技计划(2017B010117010)、华南农业大学教改项目(JG200064)

*E-mail: xianjw@scau.edu.cn

宽带频率和相位可调的器件。胡春光团队^[2]以 Nd:GGG 激光晶体为研究对象,模拟了采用准布儒斯特角法检测晶体表面质量的变化过程,发现准布儒斯特角的偏移量和相位角的变化曲线斜率可以准确地反映抛光过程中表面质量的变化情况。Bernard 团队设计了一种具有布儒斯特角的石英管,对沃利斯和波米伦兹静电密封技术在低温玻璃真空坚固光学窗口密封中的应用进行介绍^[3]。D'Aguzzo 团队^[4]设计和制备了一种满足布儒斯特角的声学新材料,这种材料由具有亚波长孔径的硬金属组成,其对超宽带频率范围内的声波完全透明,可用于医疗诊断和噪声控制等领域。Zhu 团队^[5]围绕布儒斯特角进一步研究了光子自旋分裂的现象,研究得到束腰半径是从玻璃-空气界面反射高斯光束的有限穿透深度的上限,此外实验室中的光学实验常将激光作为光源,气体激光器中将布儒斯特窗作为激光束的输出窗口。

相比于一般光源,高斯光束具有很多优点,其中光能量在空间的分布高度集中在光的传播方向上,即具有很好的方向性,同时光强分布有着特殊性,其在横截面上的光强分布呈现高斯函数分布^[6]。高斯光束的应用和研究有很多,如叶大华^[7]理论计算推导了高斯光束的桶中功率、到靶功率密度以及光强等公式,对激光系统的设计和使用具有一定的价值;Wan 等^[8]研究了高斯光束以布儒斯特角入射后,光束中心的横向位移;Liu 等^[9]利用了高度聚焦的高斯光束制成光镊,其具有特别高的捕获能力和分辨率,可以用于捕获和操纵具有高折射率的纳米介质球;Li 等^[10]根据平面波谱的理论,对平行极化高斯光束以布儒斯特角入射在聚乙烯板上的反射光束进行测量分析,发现反射光束在近场中存在很弱的双峰反射。高斯光束在光学中的应用非常广泛,如很多激光光源为高斯光束,其光强在横截面上的分布类型为高斯函数型,因此认识高斯光束是激光光学传输研究领域中的重要一课。

对于以布儒斯特角入射的高斯光束,其传输特性的研究目前大部分集中于近似解析和实验研究方法,而对其基本传输过程进行数值模拟鲜有研究。本文采用 COMSOL Multiphysics 多物理场仿真软件,对以布儒斯特角入射的高斯光束的传输过程进行数值模拟,采用平面波近似的方法研究高斯光束的反射和透射光强分布变化,进一步研究不同

折射率下高斯光束的传输特点,并通过图像对其进行直观显示,为光学器件的设计提供一定的创新思路。

2 基本原理

平面波谱是一种分析高斯光束的传播及其与介质界面相互作用的常用有效方法,即将高斯光束看作由均匀的平面波组成,水平方向的振幅分布由高斯空间谱函数来确定。在几何光学领域,高斯光束的整体特性被视为所有平面波分量的线性叠加,各分量的平面波均满足经典的反射和透射电磁理论。在数值模拟的模型中,光束的光斑尺寸远大于波长,此时平面波的关系式对于高斯光束来说也是很好的近似函数,所以基于平面电磁波的理论也可以研究高斯光束的反射和折射定律。在几何光学领域,普遍采用菲涅耳公式来解决光束在两种介质界面的反射和折射问题^[11]。

3 模型的建立与分析

COMSOL Multiphysics 是一款大型的高级数值仿真软件,广泛应用于各个领域的研究以及科学计算,模拟科学和工程领域的各种物理过程,实验中采用 COMSOL Multiphysics 软件对以布儒斯特角入射的高斯光束进行研究。

研究过程中,采用波长为 1×10^{-6} m、束腰半径为 1×10^{-5} m 和准直距离为 3.1416×10^{-4} m 的高斯光束。两个界面初始设置为空气与玻璃,其中空气的折射率 n_1 为 1,玻璃的折射率 n_2 为 1.5。参数设定如表 1 所示^[12],其中 c 为光速。

根据表 1 得到入射的高斯光束的强度分布曲线,如图 1 所示。将几何结构定义为具有对角线边界的矩形,对角线边界的两边分别为具有两种不同折射率的材料,即空气和玻璃。在矩形窗口中,设置几何结构的长和宽以构建对象,得到的几何结构如图 2 所示。

高斯光束从几何结构的左边水平入射,由于矩形介质的长宽比为 3:2,则此时入射角 θ 可表示为

$$\tan \theta = \frac{b}{a} = \frac{3}{2}, \quad (1)$$

式中: $\theta \approx 56.30800027^\circ$ 。在该情况下,当光束水平入射到交界面上时,入射角即为布儒斯特角^[13-14]。

表 1 模型的参数设定

Table 1 Model parameter setting

Description	Symbol	Expression	Value
Wavelength	$\lambda/\mu\text{m}$	1	1×10^{-6}
Frequency	f_0/s^{-1}	c/λ	2.9979×10^{14}
Spot radius	w_0/m	10λ	1×10^{-5}
Rayleigh range	z_0/m	$w_0^2\pi/\lambda$	3.1416×10^{-4}
Refractive index of glass	n_2	1.5	1.5
Angle of incidence	α/rad	$\text{atan}(n_2)$	0.98279
Propagation width	a/m	$6w_0$	6×10^{-5}
Propagation length	b/m	an_2	9×10^{-5}
Refracted angle	α_2/rad	$\text{asin}(\sin \alpha/n_2)$	0.588
Wave number in air	k_0/m^{-1}	$2\pi/\lambda$	6.2832×10^6
First wave, y component(air)	$k_{1y,\text{air}}/\text{m}^{-1}$	0	0
Second wave, x component(air)	$k_{2x,\text{air}}/\text{m}^{-1}$	$-k_0\cos(2\alpha)$	2.4166×10^6
Second wave, y component(air)	$k_{2y,\text{air}}/\text{m}^{-1}$	$-k_0\sin(2\alpha)$	-5.7999×10^6
First wave, x component(glass)	$k_{1x,\text{glass}}/\text{m}^{-1}$	$k_0n_2\cos(\alpha-\alpha_2)$	8.6998×10^6
First wave, y component(glass)	$k_{1y,\text{glass}}/\text{m}^{-1}$	$k_0n_2\sin(\alpha-\alpha_2)$	3.6249×10^6
Second wave, x component(glass)	$k_{2x,\text{glass}}/\text{m}^{-1}$	$-k_0n_2\cos(\alpha+\alpha_2)$	-5.771×10^{-10}
Second wave, y component(glass)	$k_{2y,\text{glass}}/\text{m}^{-1}$	$-k_0n_2\sin(\alpha+\alpha_2)$	-9.4248×10^6

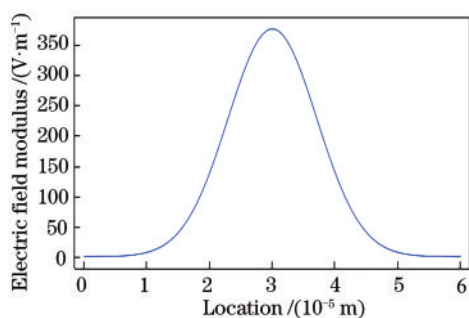


图 1 p 偏振情况下入射的高斯光束强度分布曲线

Fig. 1 Intensity distribution curve of incident Gaussian beam with p polarization

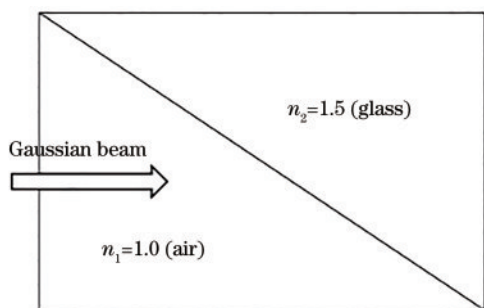


图 2 入射几何结构的模型

Fig. 2 Model of incident geometry

4 模拟结果

4.1 s 偏振与 p 偏振图像

本节对面外偏振(s 偏振)和面内偏振(p 偏振)

两种情况进行讨论,对以布儒斯特角入射的高斯光束的光场分布情况进行分析。

在电场分量中选择 s 偏振,即偏振方向与入射平面正交,模拟结果如图 3(a)所示。在电场分量中

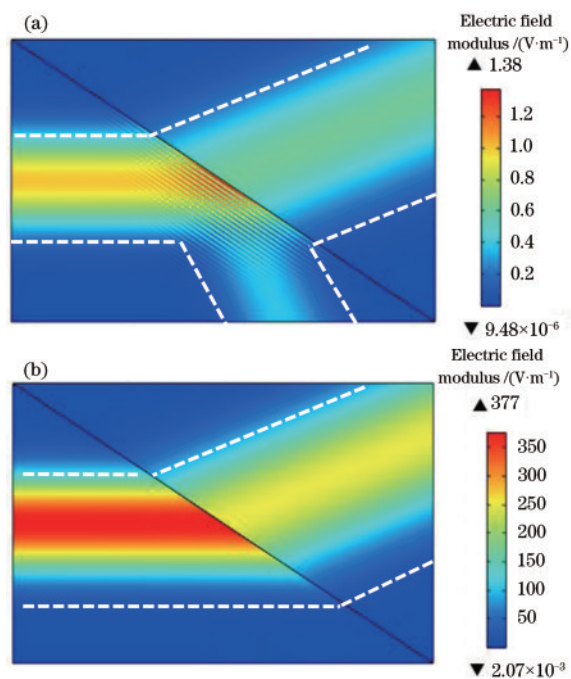


图 3 反射光和透射光在不同偏振情况下的电场模量分布示意图。(a) s 偏振;(b) p 偏振

Fig. 3 Schematic of electric field modulus distribution of reflected and transmitted light in different polarization conditions. (a) s polarization; (b) p polarization

选择 p 偏振, 即偏振方向在入射平面上, 模拟结果如图 3(b) 所示。

从图 3 可以看到, 当两种偏振情况下的高斯光束以布儒斯特角入射时, 高斯光束的电场强度从中间向两边递减, 强度主要集中在范围为 $\pm 10 \times 10^{-6}$ m, 该区域几乎覆盖高斯光束的所有光能量; 在 s 偏振方向, 反射光和折射光都存在, 反射波的波矢量与透射波相互垂直, 折射光束和反射光束的电场强度从中间向两边递减, 强度主要集中在范围为 $\pm 10 \times 10^{-6}$ m; 在 p 偏振方向, 反射光不存在, 折射光存在, 折射光束的电场强度从中间向两边递减, 强度主要集中在范围为 $\pm 10 \times 10^{-6}$ m; 相比于入射光束, 折射光束的电场强度均存在很大程度的递减。p 偏振下, 布儒斯特角的反射率为

$$|r_p|^2 = \left[\frac{E'_{10}}{E_{10}} \right]_p^2 = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1} = \left(\frac{n_2 - \tan \theta_1}{\tan \theta_1 + n_2} \right)^2 = 0, \quad (2)$$

式中: θ_1 和 θ_2 分别为入射角和反射角; E_{10} 和 E'_{10} 分别为反射波电场矢量和入射波电场矢量。在

p 偏振的情况下, 当高斯光束以布儒斯特角入射时, 理论可得反射率为 0, 即不会出现反射光束, 数值模拟的结果与非涅耳理论符合, 且使用图像的方式可以将 s 偏振与 p 偏振两种情况直观表现出来。

4.2 边界电场模量分析

使用入射界面、反射界面和折射界面的电场模量, 可以近似得到入射光束、反射光束及折射光束的强度变化, 从而得到 s 偏振与 p 偏振情况下各边界的电场模量。

s 偏振情况下, 各边界的电场模量如图 4(a) 所示。从图 4(a) 可以看到, 折射光束与入射光束相似, 均呈现高斯分布, 这可以验证计算结果的正确性, 即使用平面波谱分析研究高斯光束入射到介电板上的透射和反射可行。

p 偏振情况下, 各边界的电场模量如图 4(b) 所示。从图 4(b) 可以看到, 反射界面的电场模量基本趋近于 0, 数值无明显变化; 折射界面的电场模量及两介质界面均会呈现高斯分布, 此时折射界面的电场模量曲线与介质界面不重合, 折射光束的电场模量小于反射折射界面。

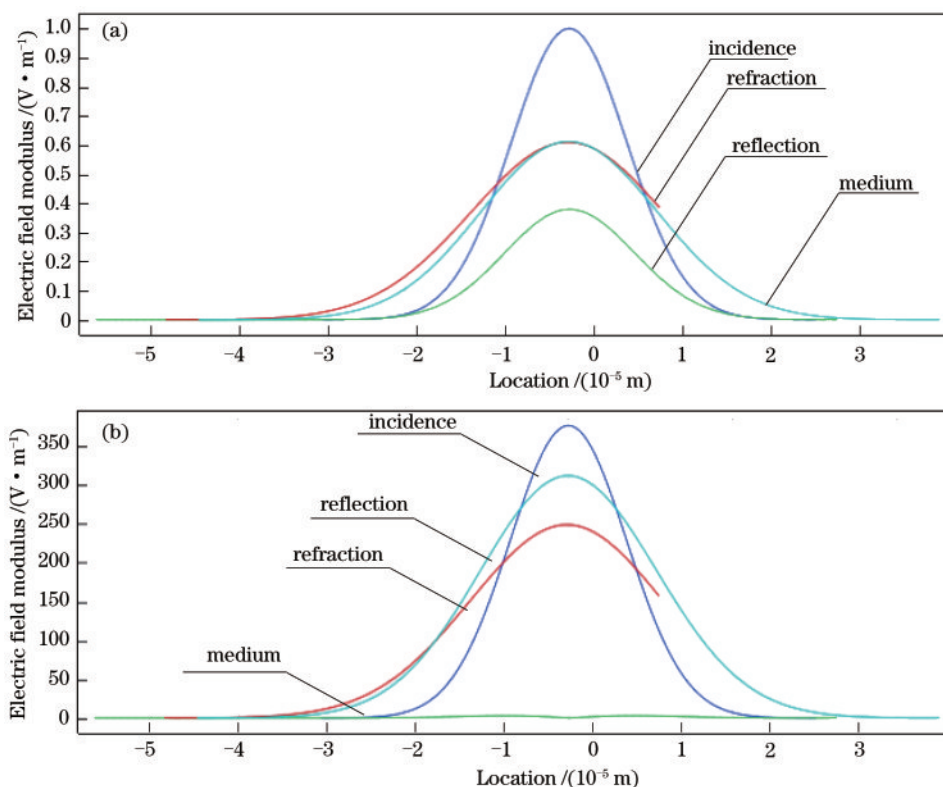


图 4 不同偏振情况下的电场模量。(a) s 偏振; (b) p 偏振

Fig. 4 Electric field modulus in different polarizations. (a) s polarization; (b) p polarization

对比图 3 和图 4 可以看到, p 偏振情况下, 入射光束、反射光束和折射光束的电场模量都远大于 s 偏振情况下的光束, 其中 s 偏振入射光束的电场模量的最大值为 1 V/m, p 偏振入射光束的电场模量的最大值为 370 V/m; s 偏振折射光束的电场模量的最大值为 0.6 V/m, p 偏振折射光束的电场模量的最大值为 250 V/m; s 偏振情况下, 介质界面的电场模量曲线与折射边界基本重合, 但 p 偏振情况下两者数值存在差异; s 偏振情况下, 反射界面的电场

模量均小于入射界面, 即入射的高斯光束, 反射光束此时不呈现高斯分布, 此时入射和反射光束均会产生干涉; p 偏振情况下, 反射界面的电场模量的数值无明显变化, 为此后续对 p 偏振反射光束进行进一步的研究。

4.3 p 偏振反射光束

p 偏振情况下, 横坐标的范围设为 $-4 \times 10^{-5} \sim 4 \times 10^{-5}$ m, 纵坐标的范围设为 $-1 \sim 5$ V/m, 放大反射界面的电场模量, 如图 5 所示。

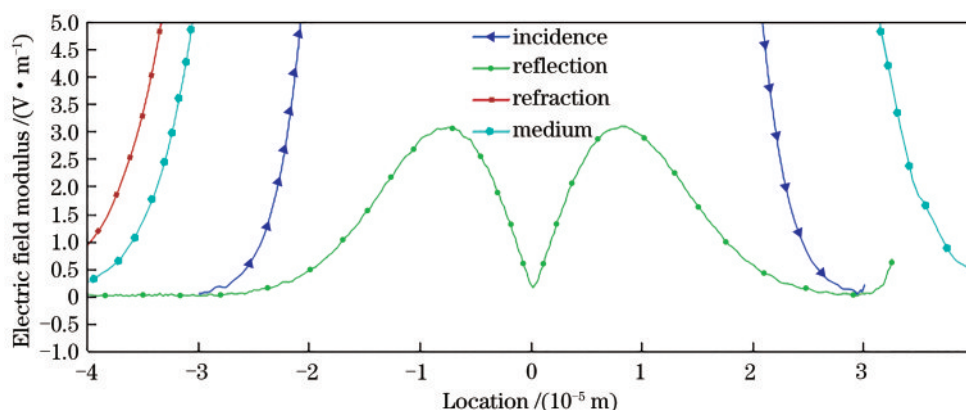


图 5 图 4(b) 的局部放大图

Fig. 5 Partial enlargement of Fig. 4(b)

从图 5 可以看到, 反射光束的电场模量并不是保持不变且持续为零的, 即当平行偏振光束以布儒斯特角入射到介质板上时, 反射边界的中点位置的电场模量为 0, 而反射的横向轮廓有两个几乎相等但又略有不同的峰。

目前, 平面波谱是一种分析高斯光束的传播及其与介质界面相互作用的有效方法, 高斯光束被视为所有平面波分量的线性叠加, 反射和透射的经典电磁理论适用于每一个分量。研究表明, 高斯光束组合的电磁波场光谱强度并不完全遵循几何光学给出的平面波特性, 而且这种近似方法得到的结论与高斯光束的基本特性有一定差异, 这也是 s 偏振的反射光束出现中心凹陷的双瓣轮廓的主要原因之一。研究表明, 当高斯光束的中心分量平面波恰好以布儒斯特角入射时, 能够抑制中心的功率密度; 而布儒斯特角以外的其他平面波分量有助于反射, 并在侧面形成波峰^[10]。

Li 等^[10]在厚的聚乙烯板上研究了平行极化高斯光束以布儒斯特角入射在界面上的反射情况, 并与理论结果进行对比, 得到当平行偏振光束以布儒斯特角或附近角入射到介电板上时, 反射光束具有共同的形态, 可以显示出具有中心凹陷的双瓣轮廓。当入射角

为布儒斯特角时, 反射界面的横向轮廓有两个几乎相等但略有不同的峰, 与仿真结果一致。当入射角大于布儒斯特角时, 反射光束的中心射线向轴的负方向移动, 导致左峰高于右峰; 当入射光束小于布儒斯特角时, 两个峰值的振幅互换, 这与介质界面的反射和折射电磁波的偏转有关; 当入射角显著偏离布儒斯特角时, 则一个峰压倒另一个峰, 此时中心凹陷的双瓣轮廓现象消失, 此时更接近一个简单的高斯轮廓。

综上所述, 平面波谱的理论可以成功地应用于介质面上高斯光束的反射和透射的模拟和测量。当高斯光束以布儒斯特角入射时, s 偏振情况下, 折射光束与反射光束都为高斯光束, 且光束方向互相垂直; p 偏振情况下, 折射光束为高斯光束, 反射光束不存在。值得注意的是, 当平行偏振光束入射到布儒斯特窗口时, 出现中心强度显著抑制的双瓣剖面, 而且存在很弱的双峰反射。

5 介质折射率改变

本节研究不同介质中高斯光束的传输特性。选取 n_2 值分别为 1.70、1.50、1.33 和 1.20, 不同折射率下反射光和透射光的电场模量分布图分别如图 6 (s 偏振) 和图 7 (p 偏振) 所示。

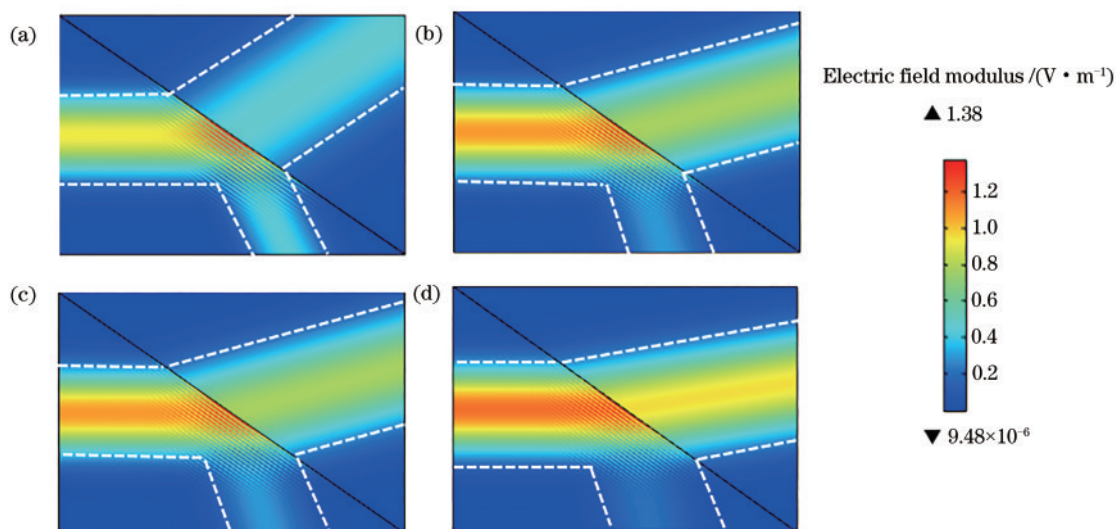


图 6 s 偏振反射光和透射光在不同折射率下的电场模量分布示意图。(a) 1.70; (b) 1.50; (c) 1.33; (d) 1.20

Fig. 6 Schematic of electric field modulus distribution of s polarization reflected light and transmitted light under different refractive indices. (a) 1.70; (b) 1.50; (c) 1.33; (d) 1.20

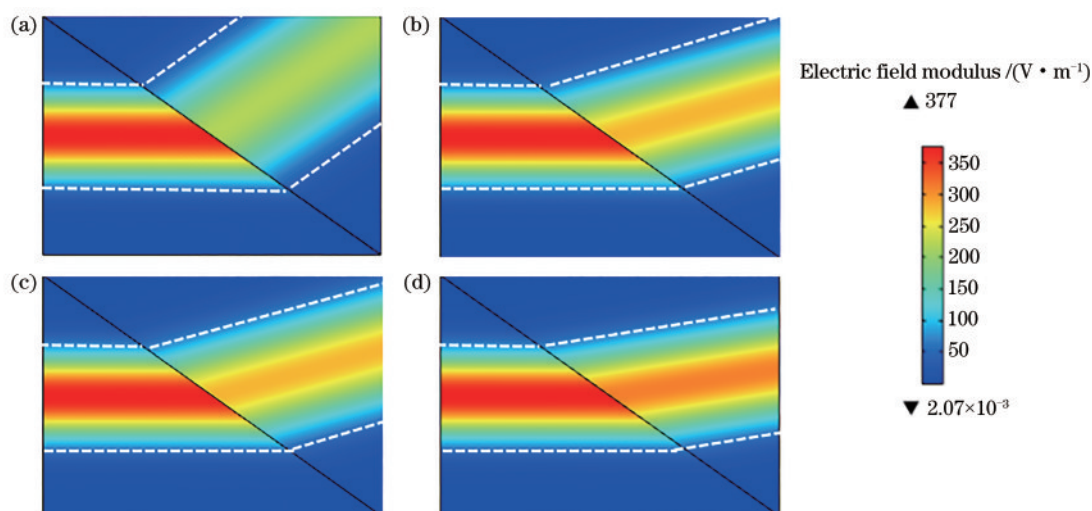


图 7 p 偏振反射光和透射光在不同折射率下的电场模量分布示意图。(a) 1.70; (b) 1.50; (c) 1.33; (d) 1.20

Fig. 7 Schematic of electric field modulus distribution of p polarization reflected light and transmitted light under different refractive indices. (a) 1.70; (b) 1.50; (c) 1.33; (d) 1.20

从图 6 可以看到,随着 n_2 值的减小,反射光束的电场模量逐渐减小,强度变化不明显,折射光束的折射角度越小,则强度集中范围越宽,而且能量越来越高,其电场模量与入射光束相差越来越小,可以明显看到具有高斯光束的特征。

从图 7 可以看到,图像无法直接观察到反射光束,但从图 5 可以看到反射光束出现在中心凹陷的双瓣轮廓,在中心两边有两个几乎相等但略有不同的峰;此时折射光束的变化情况与 s 偏振情况一致,折射角度越小,则强度集中范围越宽,折射光束的能量越来越高。

6 结 论

首先采用 COMSOL Multiphysics 软件对以布儒斯特角入射的高斯光束进行研究,然后对该情况下的高斯光束特性及相关数值计算过程进行分析,最后探索折射率变化对反射光束和透射光束的影响。将面内偏振及面外偏振进行对比并对各界面的电场模量进行研究,放大 p 偏振情况下的反射光束,改变介质折射率对其进行进一步的观察。

仿真结果表明,s 偏振情况下,当高斯光束以布儒斯特角入射时,折射光束为高斯光束,反射光束的

方向与折射光束互相垂直; p 偏振情况下, 折射光束为高斯光束, 反射光束在图像上不存在; 放大反射界面的电场模量, 可以观察到反射界面的电场模量出现中心强度显著抑制的双瓣剖面, 而且出现很弱的双峰反射, 此起伏波动特别小; 在改变折射率的情况下, 折射率越大, 折射光束的强度集中范围越窄, 能量越来越低, 其电场模量与入射光束相差越来越小。

参 考 文 献

- [1] Chen Z F, Chen X Q, Tao L, et al. Graphene controlled Brewster angle device for ultra broadband terahertz modulation [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 4909.
- [2] Hu C G, Sun Z Y, Fang Z X, et al. Study on surface quality of polished optical materials with quasi-Brewster angle method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(2): 315-323.
胡春光, 孙兆阳, 方子璇, 等. 基于准布儒斯特角法研究抛光过程中光学材料的表面质量 [J]. *光学精密工程*, 2020, 28(2): 315-323.
- [3] Smith B. Laser Brewster window sealing techniques [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1973, 9(5): 546-548.
- [4] D'Aguzzo G, Le K Q, Trimm R, et al. Broadband metamaterial for nonresonant matching of acoustic waves [J]. *Scientific Reports*, 2012, 2: 340.
- [5] Zhu W G, Yu J H, Guan H Y, et al. The upper limit of the in-plane spin splitting of Gaussian beam reflected from a glass-air interface [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 1150.
- [6] Wei L Z. The properties of the Gauss beam laser [D]. Changchun: Jilin University, 2004: 1-8.
魏立志. 高斯光束的特性研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2004: 1-8.
- [7] Ye D H. Analysis of characteristics of Gaussian beam and its application [J]. *Laser Technology*, 2019, 43(1): 142-146.
叶大华. 高斯光束特性分析及其应用 [J]. *激光技术*, 2019, 43(1): 142-146.
- [8] Wan T, Liu S Q, Luo Z M, et al. Spin-dependent splitting rotation of a Gaussian beam reflected from an air-glass interface [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(2): 1-11.
- [9] Liu Z R, Wang X, Hang K L. Enhancement of trapping efficiency by utilizing a hollow sinh-Gaussian beam [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 10187.
- [10] Li Q M, Vernon R J. Theoretical and experimental investigation of Gaussian beam transmission and reflection by a dielectric slab at 110 GHz [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2006, 54(11): 3449-3457.
- [11] Liu Z G. Reflection and refraction of the planar electromagnetic wave on the interface between two media [J]. *Journal of Beijing Union University*, 2004, 18(1): 32-35.
刘志刚. 平面电磁波在两种介质表面上的反射与折射 [J]. *北京联合大学学报 (自然科学版)*, 2004, 18(1): 32-35.
- [12] COMSOL. Gaussian beam incident at the Brewster angle [EB/OL]. [2020-08-11]. <https://uk.comsol.com/model/gaussian-beam-incident-at-the-brewster-angle-17093>.
- [13] Zhou H Y, Fan Z H. A brief discussion on Brewster angle and its optical application [J]. *Science & Technology Information*, 2012, 10(18): 222-223.
周泓宇, 樊智慧. 浅谈布儒斯特角及其光学应用 [J]. *科技资讯*, 2012, 10(18): 222-223.
- [14] Guo S H. *Electrodynamics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008: 143-172.
郭硕鸿. *电动力学* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2008: 143-172.