

文章编号: 1005-4642(2023)07-0021-04

布儒斯特定律的教学实验研究

梁 健, 张诗荣, 张艺璇, 赵馨颖, 任立勇

(陕西师范大学物理学与信息技术学院, 陕西 西安 710119)

摘 要: 基于双向反射分布函数实验装置设计了验证布儒斯特定律的教学实验. 通过测量介质反射面的反射光偏振态, 可得到 p 偏振光消光时的入射角, 即布儒斯特角, 从而计算出该介质反射面的折射率. 利用金属反射面和介质反射面的折射率差异, 通过测量反射光的圆偏振分量, 辨别金属/介质反射面. 同时, 通过测量金属反射面的反射光偏振态, 可得到圆偏振分量最大时的入射角, 即金属反射面的伪布儒斯特角.

关键词: 偏振; 布儒斯特定律; 介质表面; 金属表面

中图分类号: O436.3; O435.1

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2023.07.004

大学普通物理实验中, 有些实验涉及到光的偏振, 但研究偏振光定律的实验只有“偏振光的观察和研究”^[1], 该实验着重考查学生对马吕斯定律的理解. 而布儒斯特定律同样非常重要, 且应用非常广泛, 例如偏振分光镜、介质折射率测量和消除镜面耀光等. 因此, 设计基于布儒斯特定律的物理实验, 有利于学生加深和拓展对光的偏振知识点的理解.

本文基于双向反射分布函数 (Bidirectional reflection distribution function, BRDF) 实验装置设计了验证布儒斯特定律的实验. 通过测量介质反射面和金属反射面的布儒斯特角区分 2 种反射面, 有助于学生加深对布儒斯特定律的理解.

1 布儒斯特定律

1.1 介质表面反射的布儒斯特定律

光在反射时可以产生偏振^[2]. 自然光的电矢量可以分解为平行于入射面的分量 (p 光) 和垂直于入射面的分量 (s 光). 由菲涅耳公式可知, p 光和 s 光的振幅比可分别表示为

$$\frac{A_p'}{A_p} = \frac{\tan(i_1 - i_2)}{\tan(i_1 + i_2)}, \quad (1)$$

$$\frac{A_s'}{A_s} = -\frac{\sin(i_1 - i_2)}{\sin(i_1 + i_2)}, \quad (2)$$

其中, i_1 和 i_2 分别表示入射角和折射角. 从式(1)可以看出, 当 $i_1 + i_2 = \frac{\pi}{2}$ 时,

$$\frac{A_p'}{A_p} = 0. \quad (3)$$

即在反射光中不存在 p 分量, 只有 s 分量. 根据折射定律

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2, \quad (4)$$

当满足 $i_1 + i_2 = \frac{\pi}{2}$ 时, 式(4)可以改写为

$$\tan i_{10} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (5)$$

其中, i_{10} 表示特殊的入射角, 该角被称为布儒斯特角. 式(5)表示的关系称为布儒斯特定律. 当自然光以布儒斯特角入射到介质表面时, 其反射光为线偏振光.

1.2 金属表面反射的布儒斯特定律

金属与电介质的重要区别在于前者具有较大的电导率 σ , 而后者的 σ 趋于零. 因此, 在金属表面反射时, 需考虑金属的复介电常量:

$$\bar{\epsilon} = \epsilon + i \frac{\sigma}{\omega}. \quad (6)$$

其中, ω 为入射光的角频率. 则金属的复折射率可表示为

$$\bar{n} = n + ik = c \sqrt{\bar{\epsilon} \mu}, \quad (7)$$

收稿日期: 2023-04-03; 修改日期: 2023-06-07

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划一般项目 (No. 2022JQ-612)

作者简介: 梁 健 (1986—), 男, 山东威海人, 陕西师范大学物理学与信息技术学院副研究员, 博士, 主要研究方向为偏振光学. E-mail: jianliang@snnu.edu.cn

通信作者: 赵馨颖 (1991—), 女, 陕西咸阳人, 陕西师范大学物理学与信息技术学院讲师, 博士, 主要研究方向为奇点光学、结构光场/电磁场. E-mail: zhaoxinying@snnu.edu.cn

其中 n, k 分别为 \bar{n} 的实部和虚部; c 为真空中的光速; μ 为介质的磁导率. 与式(5)相比, 式(7)所示的金属折射率具有虚部, 因此其反射光中的 s 分量和 p 分量之间的相位延迟会发生变化, 即当入射光为线偏振光时, 反射光具有圆偏振分量.

在金属表面反射时, 式(4)中的折射率可用式(7)替代, 则式(1)和式(2)可改写为

$$\frac{A_p'}{A_p} = \frac{\bar{n}^2 \cos i_1 - \sqrt{\bar{n}^2 - \sin^2 i_1}}{\bar{n}^2 \cos i_1 + \sqrt{\bar{n}^2 - \sin^2 i_1}}, \quad (8)$$

$$\frac{A_s'}{A_s} = \frac{\cos i_1 - \sqrt{\bar{n}^2 - \sin^2 i_1}}{\cos i_1 + \sqrt{\bar{n}^2 - \sin^2 i_1}}. \quad (9)$$

从式(8)和式(9)可以看出: 反射光的 p 分量和 s 分量不再消光, 而是发生相位延迟, 根据入射角的不同, 反射光由线偏振光逐渐变化为圆偏振光. 此处省略了详细的推导过程, 仅给出推导结果, p 分量和 s 分量的相位延迟可表示为^[3]

$$\tan \varphi_p = \frac{2 \cos i_1 [2nkA - (n^2 - k^2)B]}{(n^2 + k^2)^2 \cos^2 i_1 - (A^2 + B^2)}, \quad (10)$$

$$\tan \varphi_s = \frac{2B \cos i_1}{A^2 + B^2 - \cos^2 i_1}, \quad (11)$$

其中,

$$A = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{(n^2 - k^2 - \sin^2 i_1)^2 + 4n^2 k^2} + (n^2 - k^2 - \sin^2 i_1)},$$

$$B = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{(n^2 - k^2 - \sin^2 i_1)^2 + 4n^2 k^2} - (n^2 - k^2 - \sin^2 i_1)}.$$

因此, 反射光中 p 分量和 s 分量的相位延迟为

$$\Delta\varphi = |\varphi_s - \varphi_p|. \quad (12)$$

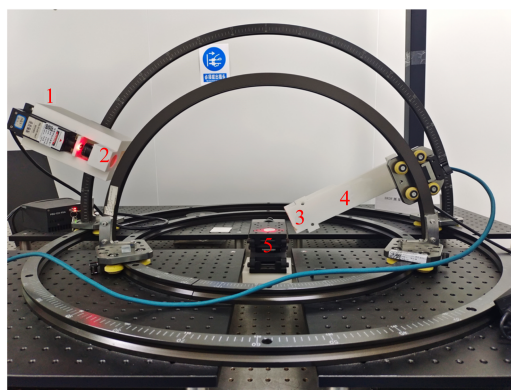
当 $\Delta\varphi = \pi/2$ 时, 反射光可能变为圆偏振光. 需要注意: 圆偏振光的产生条件较为苛刻, 除了满足相位延迟的要求外, 还要求反射光中的 s 分量和 p 分量振幅相等. 因此, 金属表面反射布儒斯特定律的定义为: 在该角度入射条件下, 反射光中的线偏振分量最小. 满足该条件的入射角称为金属表面反射的布儒斯特角. 为区分介质表面和金属表面反射, 又将金属表面反射的布儒斯特角称为伪布儒斯特角(Pseudo-Brewster angle)^[4].

综上, 根据金属表面和介质表面的反射特性, 利用布儒斯特定律, 通过测量反射光的圆偏振分量, 可有效区分金属反射面和介质反射面. 这也是本文提出布儒斯特定律验证实验的设计思想.

2 实验器材及设备

实验装置图如图1所示, 实验所用器材和设

备包括: BRDF 实验装置、红光激光光源、线偏振片、消色差波片、偏振相机(型号: PHX050S-PC, 分辨率: 2448×2048 pixel)、待测样品. 其中, 红色激光光源和偏振相机分别放在 BRDF 实验装置的 2 个半圆形臂上; 线偏振片作为起偏器放置在激光光源前, 偏振化方向与入射面成 45° 夹角, 以保证入射线偏振光的 p 分量和 s 分量相同; 消色差波片作为检偏器放置在偏振相机前, 其光轴与入射面垂直. 注意, 偏振相机可以由光功率计和线偏振片替代, 不影响实验结果.



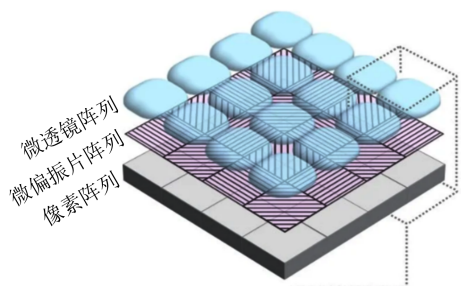
1. 红光激光光源 2. 线偏振片 3. 消色差波片
4. 偏振相机 5. 待测样品

图1 实验装置图

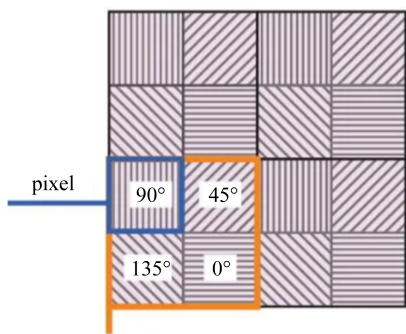
图1中, 反射光圆偏振分量的测量主要由消色差波片和偏振相机里的微偏振片阵列完成. 偏振相机的成像原理示意图如图2所示. 图2(a)为偏振相机的结构, 从上到下分别为微透镜阵列、微偏振片阵列和像素阵列, 其偏振成像原理为每个像素只能接收1种偏振态的入射光. 微透镜阵列的作用是将每个像元位置处的入射光进一步聚焦到像元中心, 防止像元间的强度串扰. 微偏振片阵列的结构如图2(b)所示, 微偏振片阵列中每4个偏振片为1组, 分别接收 0° , 45° , 90° 和 135° 的偏振光. 实验中, 旋转消色差波片, 将消色差波片的光轴(快轴)与偏振相机的 0° 方向的偏振片平行, 则 45° 和 135° 方向的偏振片与消色差波片的光轴方向存在 $\pm 45^\circ$ 的夹角. 当夹角为 45° 时, 检测的是左旋圆偏振光; 当夹角为 -45° 时, 检测的是右旋圆偏振光.

待测样品为2块反射镜, 反射面分别是介质反射面和金属反射面, 如图3所示. 2种反射面在

可见光范围均具有较高反射率,因此普通成像难以分辨,但用图 1 所示的实验装置,通过测量反射光的圆偏振分量,可快速有效地判断反射面性质.



(a) 偏振相机结构



(b) 微偏振片阵列结构

图 2 偏振相机成像原理示意图



图 3 待测样品反射面的实物图

3 实验结果与实验分析

3.1 实验内容

布儒斯特定律验证实验主要分为 3 个实验,分别是:

- a. 区分金属反射面和介质反射面;
- b. 测量介质反射面的布儒斯特角;
- c. 测量金属反射面的伪布儒斯特角.

具体实验步骤为:

1) 安装起偏器和检偏器. 起偏器为线偏振片,偏振化方向与入射面成 65° 夹角;检偏器为消色差波片,光轴方向与入射面垂直.

2) 在 BRDF 实验装置的两臂上分别安装并固定激光光源和偏振相机,调节角度,使光源、相机和待测样品满足反射定律.

3) 光源扩束准直后,经待测样品反射,由偏振相机接收. 此时,需要调节相机的曝光时间,通过观察图像的亮度(灰度值显示小于 255)保证入射到相机的光强合适.

4) 激光光源以 65° 角入射,由相机接收偏振图像. 从相机的偏振图像中提取圆偏振信息. 若有圆偏振信息,则待测反射面是金属反射面;若无圆偏振信息,则待测反射面为介质反射面.

5) 放置介质反射面,激光光源的入射角度从 40° 逐渐增加到 70° ,每隔 5° 记录 1 张强度图像.

6) 放置金属反射面,激光光源的入射角度从 40° 逐渐增加到 70° ,每隔 5° 记录 1 张强度图像.

7) 处理图像时,设定阈值范围(一般设定灰度值 $100 \sim 150$),将阈值范围内像元的灰度值做平均处理,即为测量反射光的灰度值.

3.2 实验分析

介质反射面的反射光无相位延迟,因此在绘图时主要考虑反射光中 p 光强度和 s 光强度占总强度的百分比,即

$$\eta_p = \frac{I_p}{I_p + I_s}, \quad (13)$$

$$\eta_s = \frac{I_s}{I_p + I_s}. \quad (14)$$

按照式(13)和式(14),对强度数据进行归一化处理,即出射总光强和为 1,处理后的数据如表 1 所示.

表 1 介质反射面实验数据(归一化)

i_1	I_s	I_p	i_1	I_s	I_p
40°	0.378	0.622	60°	0.876	0.124
45°	0.402	0.598	65°	0.414	0.586
50°	0.409	0.591	70°	0.315	0.685
55°	0.368	0.632			

利用表 1 中的数据进行绘图,得到介质表面反射比曲线如图 4 所示. 从图 4 中可以看出:光以布儒斯特角入射时,反射后 p 光的光强最小,s 光的光强最大. 根据式(5),可进一步计算得到该介质的折射率.

由式(7)可知,金属反射面的折射率为复折射率,因此反射光中的 p 光和 s 光具有相位延迟,在

绘图时,主要考虑圆偏振分量的反射比,即

$$\eta_{\text{左}} = \frac{I_{\text{左}}}{I_{\text{左}} + I_{\text{右}}}, \quad (15)$$

$$\eta_{\text{右}} = \frac{I_{\text{右}}}{I_{\text{左}} + I_{\text{右}}}. \quad (16)$$

按照式(15)和式(16)对强度数据进行归一化处理,即出射总光强和为 1,处理后的数据如表 2 所示。

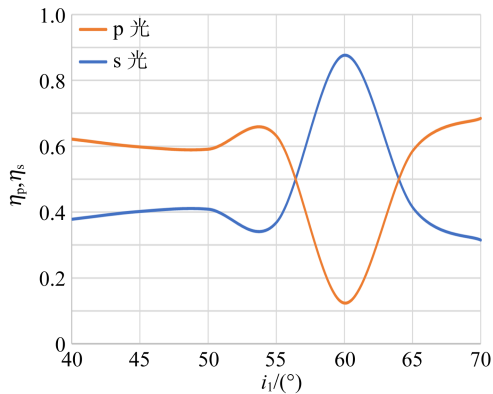


图 4 介质反射面的 p 光和 s 光反射比曲线图

表 2 金属反射面实验数据(归一化)

i_1	$I_{\text{左}}$	$I_{\text{右}}$	i_1	$I_{\text{左}}$	$I_{\text{右}}$
40°	0.404	0.596	60°	0.721	0.279
45°	0.450	0.550	65°	0.883	0.117
50°	0.510	0.490	70°	0.908	0.092
55°	0.592	0.408			

利用表 2 中的数据进行绘图,得到金属表面反射比曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出:当入射角度较小($<55^\circ$)时,左旋圆偏振光强度与右旋圆偏振光强度相当,说明没有产生圆偏振分量;当入射角进一步增大时,左旋圆偏振分量迅速增大,并在约 70° 时光强达到最大,同时右旋圆偏振光分量在该入射时光强最小,即此时的反射光圆偏振特性最强。注意,对常规金属表面反射而言,伪布儒斯特角一般在 $65^\circ \sim 75^\circ$ 之间。实验中,金属反射面的反射光测量只需在实验仪器允许范围内测量出圆偏振分量最大的角度,进行定性分析即可。

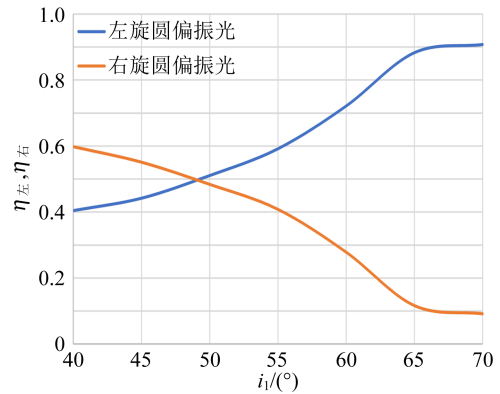


图 5 金属反射面的左旋和右旋圆偏振光反射比曲线图

综上,根据图 4 和图 5 中所示反射光偏振态的区别,可以有效判断反射面的性质。

4 结束语

本文设计了布儒斯特定律验证实验,该实验着重考查了学生对布儒斯特定律的理解,并将该定律拓展到金属表面反射中。该实验设计的优势在于:a.可以加深学生对布儒斯特定律的理解;b.可拓展到金属表面反射,激发学生对光学的兴趣;c.可将线偏振光、圆偏振光和相位延迟联系起来,将学生学习到的光的偏振知识点结构进行贯通;d.搭建实验装置的过程中,用到了偏振片和波片等偏振器件,提高了学生的动手能力。

参考文献:

- [1] 刘志存,朱刚强,高健智.普通物理实验[M].西安:陕西师范大学出版总社有限公司,2020:328-332.
- [2] 姚启钧.光学教程[M].6版.北京:高等教育出版社,2019:198-201.
- [3] Zhang Y X, Ren L Y, Liang J, et al. Refractive index inversion method for metals based on circular polarization detection of light [J]. Optics Communications, 2023,535:129344.
- [4] Jenkins F, White H. Fundamentals of optics [M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill Inc., 1976:536-541.

(下转 30 页)

2021,40(3):102-108,128.
[13] 刘海林,吴奕初,杨智慧,等. 虚实结合核物理综合

实验系统的设计与教学实践[J]. 物理实验,
2021,41(9):35-39.

A teaching case of curriculum ideology and politics integrate into modern physics experiment course

—Taking Compton scattering experiment as an example

WU Yichu, LIU Hailin, YANG Zhihui, WANG Xiaofeng, QIAO Haoxue

(National Demonstration Center for Experimental Physics Education,
School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Compton scattering experiment is one of the classical Nobel Prize physics experiments in the nuclear physics experiment teaching module of modern physics experiment. By understanding the discovery process of Compton effect and deeply comprehending the principle of Compton scattering experiment, the students could be cultivated the scientific spirit and scientific quality of exploring the unknown and pursuing the truth. Through introducing Wu Youxun's outstanding contribution to Compton scattering and his advanced deeds after returning to China, the students' native land emotion and scientific attitude of rigorous research were cultivated. Through the comparison and exploration of classical and modern nuclear equipment and measuring methods, the measuring principle and technology of modern gamma energy spectrum could be mastered, and the students' scientific spirit of daring to doubt, daring to explore and good at innovation could be cultivated; Through the experimental teaching of combination of virtual and real fusion, various methods used to verify the relationship between the gamma photons energy of Compton scattering, differential cross section and scattering angle, and the students' scientific thinking method, scientific quality and comprehensive ability of scientific experiments could be cultivated.

Key words: curriculum ideology and politics; modern physics experiment; Compton scattering experiment

[责任编辑:郭 伟]

(上接 24 页)

Research on experiment teaching of Brewster law

LIANG Jian, ZHANG Shirong, ZHANG Yixuan, ZHAO Xinying, REN Liyong

(School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: A teaching experiment for verifying Brewster law was designed based on the experimental device about the bidirectional reflectance distribution function. The incident angle of p-polarized light, known as the Brewster angle, could be obtained by measuring the polarization of the reflected light on the dielectric reflecting surface. Then the refractive index of the medium's reflecting surface could be figured out. Furthermore, by exploiting the difference between the metallic reflecting and dielectric reflecting surface in refractive index properties, the metallic/dielectric reflecting surfaces could be distinguished by measuring the circular polarization component of the reflected light. Additionally, the incident angle could be gotten in the case of the maximal circular polarization component by measuring the polarization state on the metallic reflecting surface, that was just the pseudo-Brewster angle of the metallic reflecting surface.

Key words: polarization; Brewster law; dielectric surface; metal surface

[责任编辑:郭 伟]