

文章编号: 1000-5013(2008)02-0194-04

杨氏双缝实验中的光谱位移和光谱开关

张国文, 蒲继雄, 渠 彪

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 采用不同位置探测部分相干光光谱的方法, 研究宽频带部分相干光在杨氏双缝实验中的光谱位移和光谱开关现象. 实验结果表明, 在干涉光场中, 归一化光谱在某些观测点处发生红移, 而在另一些观测点处发生蓝移, 并且在临界点位置, 光谱位移由红移迅速转变为蓝移, 即发生了光谱开关现象. 此外, 研究发现双缝参数和探测距离对杨氏双缝实验中的光谱位移和光谱开关都有影响.

关键词: 部分相干光; 杨氏双缝实验; 红移; 蓝移; 光谱开关

中图分类号: O 436

文献标识码: A

1986 年, Wolf 首次从理论上证明, 只有当准均匀光源的光谱相干度满足定标定律^[1]时, 光源发出的光在传输过程中, 其归一化光谱才会保持不变. 从违反定标定律的光源发出的光, 即使在自由空间传输, 其归一化光谱也将发生变化. 光谱位移随着空间相干度的缓慢变化而逐渐变化, 且当空间相干度达到某一临界值时, 光谱位移将从红移(蓝移) 迅速转变为蓝移(红移). 这种光谱位移迅速变化现象被定义为光谱开关(Spectral Switch)^[2,4], 国内外学者对光谱位移和光谱开关现象都进行了深入的研究^[2,6]. 有研究者对杨氏双缝实验中的光谱位移和光谱开关现象作了深入研究^[7-11], 但大多数是数值计算和理论分析. 本文研究了部分相干光在杨氏双缝实验中的光谱位移和光谱开关现象, 以及不同双缝参数和探测距离对光谱位移和光谱开关的影响.

1 实验方法

实验装置如图 1 所示. 图 1 中, S 为光源, D 为毛玻璃, A 为单缝屏, L 为消色差透镜, DS 为双缝屏($2a$, $2b$ 分别为双缝外边缘间距和内边缘间距). 光源 S 是 250 W 的宽光谱光源(卤钨灯), 其辐射光光谱的峰值波长为 574.0 nm, 源光谱宽度 $\Gamma = 90$ nm. 毛玻璃 D 和单缝 A 紧贴光源 S 依次放置, 单缝 A 的缝宽取 0.5 mm. 在单缝后放置的是一消色差透镜 L, 其焦距 $f = 300$ mm. 透镜后的双缝屏 DS 单缝屏 A 与消色差透镜 L 的距离均为一倍焦距 f . 由主光源 S 发出的光, 经毛玻璃 D 和单缝 A 后, 为完全空间非相干多色准均匀光. 根据 Van Cittert-Zernike 定理, 完全空间非相干光在自由空间传播一段距离后, 其空间相干度将逐渐增加. 因此, 光源 S 产生的完全空间非相干光传播到观测面时, 已成为部分空间相干光. 设双缝屏 DS 所在位置 $z = 0$, 观测屏位于距双缝屏 z 距离处. 考虑到单缝和双缝的长边(y 轴) 远大于短边(x 轴), 因此光场沿 y 轴方向可视为不变, 只考虑沿 x 轴方向变化. u 轴与 x 轴平行, 位于观测屏上, 实验只测量沿 u 轴方向的变化情况. 设 u 轴与 z 轴的交点 $u = 0$, 实验用 3 种类型的双缝屏来观测双缝参数对光谱的影响.

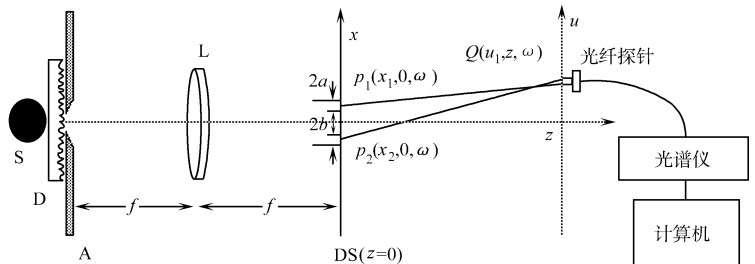


图 1 实验装置图

Fig. 1 The figures of experiment installing

收稿日期: 2007-09-15

作者简介: 张国文(1982-), 男; 通讯作者: 蒲继雄(1962-), 男, 教授, 主要从事光束传输与非线性光学研究. E-mail: jixiong@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60477041); 福建省自然科学基金资助项目(A0510018)

实验中, 探测光谱的仪器为 Ocean Optics HR 2000 型光纤光谱仪, 探头有效半径为 0.5 mm 的圆孔, 且探头放置在具有螺旋测微计的光具架上, 通过螺旋测微计来控制观测位置, 以保证测量精度.

假设入射到双缝上的光束为谢尔模型光束, 其交叉谱密度函数可表示为

$$W^{(0)}(x_1, x_2, z = 0, \omega) = S^{(0)}(\omega) \cdot \exp[-\frac{(x_1 - x_2)^2}{2\sigma^2(\omega)}]. \tag{2}$$

上式中, ω 为圆频率, x_1 和 x_2 分别为 p_1 和 p_2 两点的位置坐标, $S^{(0)}(\omega)$ 和 $\alpha(\omega)$ 分别表示入射光束的光谱和空间相关长度. 理论分析可得 Q 点的光谱为^[10]

$$S(u, z, \omega) = S_0 \frac{\Gamma^2}{(\omega - \omega_0)^2 + \Gamma^2} \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \frac{\alpha_0 \omega_0}{2cz} \cdot \exp[-\frac{u^2 \alpha_0^2 \omega_0^2}{2c^2}] \times$$
$$[\int_b^a H(x_1, u, \omega) dx_1 + \int_a^b H(x_1, u, \omega) dx_1]. \tag{3}$$

式中, $H(x_1, u, \omega) = \operatorname{erf}[\frac{\omega c(a - x_1) + iu\omega_0^2 \alpha_0^2}{\sqrt{2c\alpha_0 \omega_0}}] - \operatorname{erf}[\frac{\omega c(-a - x_1) + iu\omega_0^2 \alpha_0^2}{\sqrt{2c\alpha_0 \omega_0}}] - \operatorname{erf}[\frac{\omega c(b - x_1) + iu\omega_0^2 \alpha_0^2}{\sqrt{2c\alpha_0 \omega_0}}] + \operatorname{erf}[\frac{\omega c(-b - x_1) + iu\omega_0^2 \alpha_0^2}{\sqrt{2c\alpha_0 \omega_0}}]$, erf 为误差函数, $c = \omega/k$ 为光速, u 为场点 Q 所对应双缝中心的衍射角 ($u = u/z$), Γ 为光谱宽度.

2 实验结果

当双缝参数 $a = 0.145\ 0\ \text{mm}$, $b = 0.105\ 0\ \text{mm}$, 探测距离 $z = 400\ \text{mm}$ 时, 归一化光谱随观测距离 u 的变化图, 如图 2 所示. 图 2 中, 虚线为归一化源光谱, 实线为观测点 u 处所探测到的归一化光谱. 从图 2(a) 可以看出, 归一化光谱的峰值波长为 612.8 nm, 与源光谱峰值波长 574.0 nm 相比, 其峰值波长向长波方向移动, 即光谱发生了红移现象. 从图 2(b) 可以看出, 归一化光谱曲线已经分裂为两个波峰(主峰和次峰), 其峰值波长为 636.61 nm. 与源光谱相比, 峰值波长变大了, 即光谱位移为红移. 从图 2(c) 可以看出, 当观测距离 u 增加到 2.34 mm 时, 次峰高度相对于主峰高度进一步增加, 并与主峰高度相等. 此时, 光谱的峰值波长由 637.09 nm 跃变到 528.38 nm, 即光谱位移由红移突变到蓝移, 即发生光谱

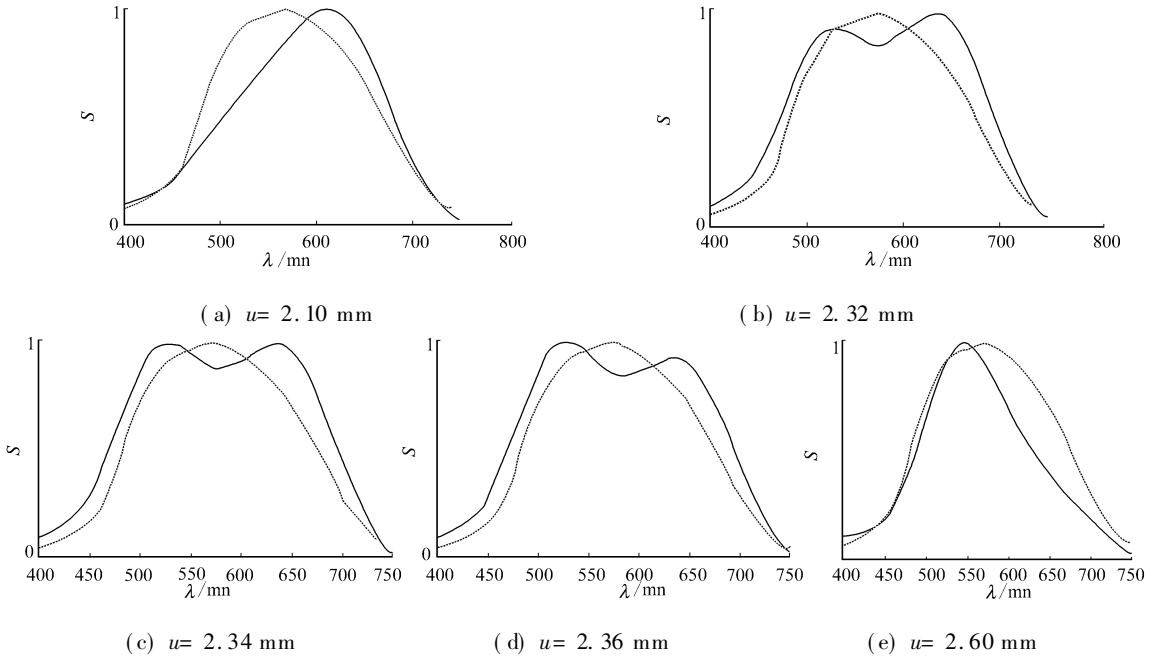


图 2 归一化光谱随观测距离的变化图

Fig. 2 Change maps of the normalized spectra with the observed range

开关现象. 当观测距离 $u = 2.36\ \text{mm}$ 时(图 2d), 归一化光谱仍然分裂为双峰, 其峰值波长为 529.84 nm, 小于源光谱峰值波长, 光谱位移为蓝移. 随着观测距离 u 的进一步增加, 归一化光谱中的次峰逐渐消失.

当 $u=2.60\text{ mm}$ 时, 其归一化光谱双峰现象消失, 其峰值波长为 547.77 nm , 小于源光谱峰值波长, 光谱位移为蓝移(图 2(e)). 从图 2 的归一化光谱变化可看出, 光谱在一些观测位置发生红移现象, 而在另一些观测位置发生蓝移现象. 在临界位置处归一化光谱出现等高双峰现象, 光谱位移由红移迅速转变为蓝移. 这与文献[7-11]中的理论分析和数值计算相符合, 而这样的光谱变化过程在本实验中可以多次观测到. 为进一步详细的显示光谱位移特性, 可定义相对光谱位移为

$$\Delta\lambda/\lambda_0 = \lambda_{\text{max}}/\lambda_0. \tag{4}$$

式(4)中, λ_{max} 为所观测光谱的峰值波长, λ_0 为源光谱的峰值波长. 由式(4)可以看出, 当 $\Delta\lambda/\lambda_0 > 0$ 时, 光谱位移为红移; 当 $\Delta\lambda/\lambda_0 < 0$ 时, 光谱位移则为蓝移. 归一化光谱的相对光谱位移随观测位置变化的关系, 如图 3 所示. 图 3(a), (b) 的双缝参数 $a=0.0825\text{ mm}$, $b=0.0425\text{ mm}$; 图 3(c), (d) 的双缝参数 $a=0.1450\text{ mm}$, $b=0.1050\text{ mm}$; 图 3(e), (f) 的双缝参数 $a=0.1650\text{ mm}$, $b=0.0850\text{ mm}$. 从图 3(a) 中可以看出, 光谱位移既有红移, 也有蓝移. 当在观测位置 u 分别在 $0.87, 2.72, 4.82\text{ mm}$ 处, 相对光谱位移 $\Delta\lambda/\lambda_0$ 从最大值跃变到最小值, 即由红移跃变为蓝移, 此时光谱开关现象发生. 当探测距离 $z=800\text{ mm}$ 时, 其光谱位移变化与图 3(a) 有相似的情形, 光谱位移从蓝移渐变到红移, 在临界位置处光谱位移发生突变, 由红移迅速变为蓝移, 然后又从蓝移渐变到红移. 图 3(b) 中也有 3 处观测位置发生光谱开关现象, 其观测位置分别为 $1.63, 5.50, 9.60\text{ mm}$. 从图 3(c) 可以看出, 光谱从蓝移渐变到红移, 在临界位

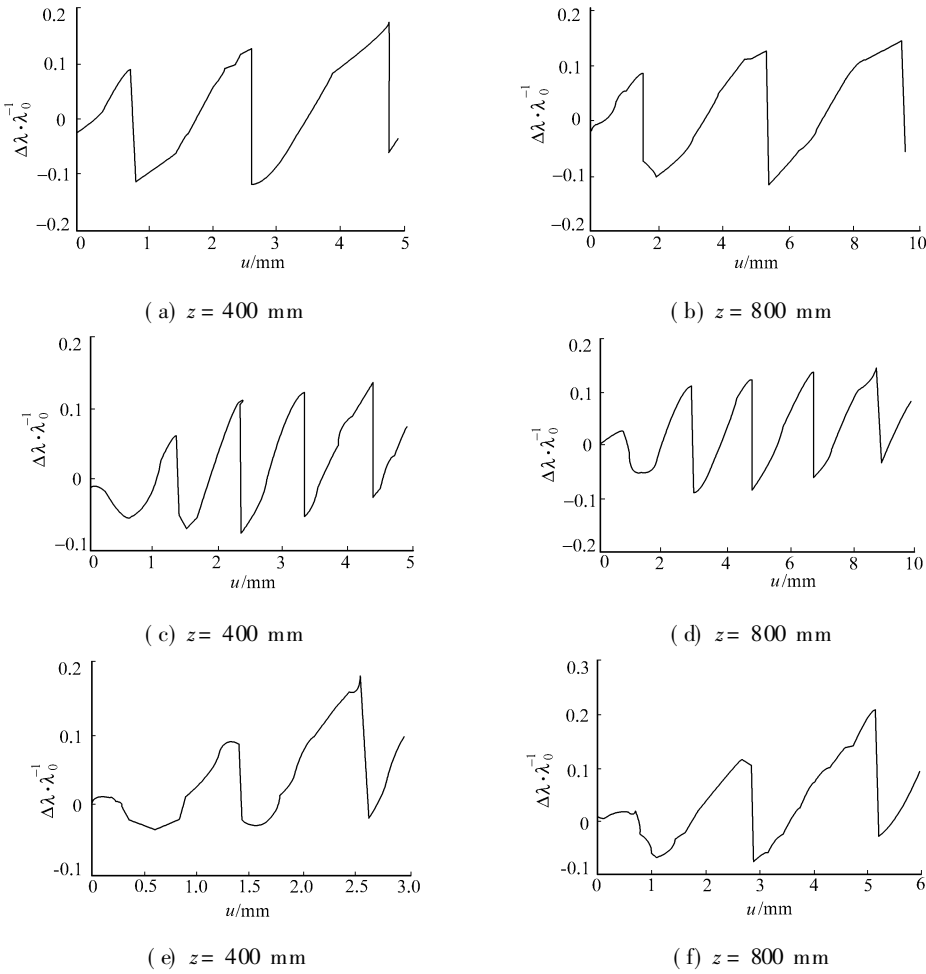


图 3 相对光谱位移变化图

Fig.3 Change maps of the relative shift of normalized spectra

置光谱位移发生突变, 从红移迅速变为蓝移, 然后又从蓝移渐变到红移, 有 4 处相对光谱位移 $\Delta\lambda/\lambda_0$ 发生突变, 即发生光谱开关现象, 所对应的观测位置分别为 $1.36, 2.35, 3.35, 4.48\text{ mm}$. 而图 3(d) 的光谱位移变化趋势与图 3(c) 的趋势相似, 总共也有 4 处发生光谱开关现象, 所对应的观测位置分别为 $2.92, 4.82, 6.83, 8.90\text{ mm}$. 从图 3(e) 中可以看出, 在观测位置分别为 $1.40, 2.60\text{ mm}$ 时, 相对光谱位移 $\Delta\lambda/\lambda_0$ 从最大值突变到最小值, 即发生光谱开关现象; 而图 3(f) 的相对光谱位移变化趋势与图 3(e) 相似, 在观

测位置分别为 2.84, 5.16 mm 处发生光谱开关现象.

3 结束语

本文研究并观测到部分相干光在杨氏双缝实验中的光谱位移和光谱开关现象. 实验结果表明, 在干涉光场的某些观测点处光谱位移为红移, 在另一些观测点处光谱位移为蓝移, 且在临界位置处光谱位移发生突变, 从红移迅速变为蓝移, 发生光谱开关现象. 光谱位移随着观测距离的改变呈周期性变化. 此外, 双缝参数的改变对光谱位移和光谱开关现象也有影响. 双缝参数 b/a 越大, 则光谱开关效应就越显著, 光谱位移和光谱开关在远场出现, 这与文献[10]中分析的一致.

参考文献:

[1] WOLF E. Invariance of the spectrum of light on propagation[J]. Phys Rev Lett, 1986, 56: 1370-1372.

[2] PU Jixiong, NEMOTO S. Spectral changes and spectral switches in the diffraction of partially coherent light by an aperture[J]. J Opt Soc Am A, 2002, 19: 339-344.

[3] PU Jixiong, ZHANG H, NEMOTO S. Spectral shifts and spectral switches of partially coherent light passing through an aperture[J]. Opt Commun, 1999, 162: 57-63.

[4] PU Jixiong, NEMOTO S. Spectral shifts and spectral switches in diffraction of partially coherent light by a circular aperture[J]. IEEE J Quant Electron, 2000, 36(12): 1407-1411.

[5] GORIO F, GUATTARI G, PALMA C. Observation of optical redshifts and blueshifts produced by source correlation[J]. Opt Commun, 1988, 67: 1-4.

[6] KANDPAL H C. Experimental observation of the phenomenon of spectral switch[J]. J Opt A, Pure Appl Opt, 2001, 3(4): 296-299.

[7] JAMES D F V, WOLF E. Some new aspects of Young's interference experiment[J]. Phys Lett A, 1991, 157(1): 6-10.

[8] KANDPAL H C, VAISHYA J S, CHANDER M. Spectral changes due to source correlation in Young's interference experiment[J]. Phys Lett A, 1992, 167(2): 114-119.

[9] PONOMARENKO S A, WOLF E. Coherence properties of light in Young's interference pattern formed with partially coherent light[J]. Opt Commun, 1999, 170(10): 1-8.

[10] PAN L, LÜ Baida. The spectral switch of partially coherent light in Young's experiment[J]. IEEE J Quant Electron, 2001, 37(11): 1377-1381.

[11] PU Jixiong, CAI Chao. Anomalous behaviour of the spectra in Young's double slit interference experiments[J]. Chin Phys Lett, 2004, 21(7): 1268-1271.

The Spectral Shift and Spectral Switch in Young's Double-Slit Experiment

ZHANG Guo-wen, PU Jixiong, QU Biao

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Adopting the technique of different position probes into the spectrum of partially coherent light, study the spectral shift and spectral switch of partially coherent polychromatic light in Young's double slit experiment. The experimental results show that, in the interference field, the normalized spectrum is redshifted at some observation points, is blueshifted at others, and the spectral shift changes rapidly from red shift to blueshifted at the critical points, i.e., the spectral switch occurs. Furthermore, it is shown that the slit parameter and observation distance effect on the spectral shift and the spectral switch in Young's double slit interference experiment.

Keywords: partially coherent light; Young's double slit experiment; redshift; blueshift; spectral switch

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 吴逢铁)