

文章编号: 0253-2239(2003)06-0707-5

杨氏实验远场的光谱位移和光谱开关*

潘留占^{1,2} 吕百达^{1,3}

- 1 四川大学激光物理与化学研究所, 成都 610064
- 2 洛阳师范学院物理系, 洛阳 471022
- 3 华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉 430074

摘要: 从部分相干光的传输定律出发,研究了杨氏双缝实验远场的光谱变化。指出杨氏实验中光谱开关在远场也会出现。缝的衍射和光的空间相干性是产生光谱开关的物理原因,增大缝参量 ϵ 和源的空间相关度 Δ 光谱开关效应越显著。作了详细的数值计算以说明远场光谱位移和光谱开关的特性,并与已有的工作进行了比较。

关键词: 物理光学; 杨氏实验; 部分相干光; 光谱位移; 光谱开关

中图分类号: O436 文献标识码: A

1 引 言

在部分相干光的理论与应用中,其光谱的特征和变化规律一直受到重视。著名的 Wolf 效应和定标律^[1]都与此有关。对部分相干光在传输中的光谱位移已作了许多研究^[2~4]。最近,蒲继雄等人发现了在一定条件下,伴随着光谱移动在临界点会出现光谱突然由红移变为兰移(或相反)的称为光谱开关的新效应^[5~7],已得到实验证实^[8]。另一方面,近年来对物理学中最重要的实验之一——杨氏干涉实验,特别是源的空间相关性引起的光谱移动作了深入研究^[9~11],并且发现在近场轴上点也可能出现光谱开关^[12]。本文主要目的是研究部分相干光入射到杨氏双缝屏时远场轴上点和轴外点光谱的变化规律,以及在远场出现光谱开关的特征,详细分析了缝参量和光源相关性对光谱开关的影响。最后,还将所得结果与文献中已有工作做了比较。

2 远场光谱

图 1 为杨氏实验装置,光束沿 z 方向传输,双缝所在屏 A 位于 $z = 0$ 平面处, P_1 和 P_2 分别为双缝中任意两点,双缝外缘和内缘间距分别为 $2a$ 和 $2b$,观察屏 B 位于 z 处。设部分相干光束为谢尔光源光束,入射到屏 A 上的交叉谱密度函数为

$$W^{(0)}(x_1, x_2, z = 0, \omega) = S^{(0)}(\omega) \exp\left[-\frac{(x_1 - x_2)^2}{2\sigma^2(\omega)}\right], \quad (1)$$

式中 ω 为圆频率, x_1 和 x_2 分别为 P_1 和 P_2 点的位置坐标, $S^{(0)}(\omega)$ 和 $\sigma(\omega)$ 分别为入射光束的光谱和空间相关长度。

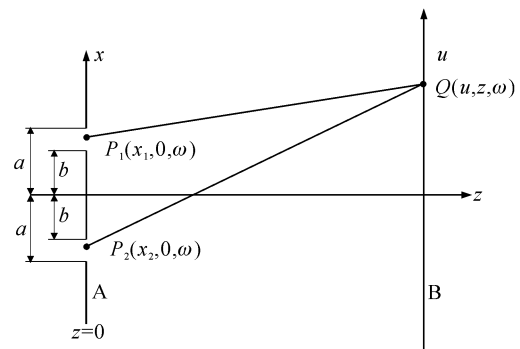


Fig. 1 Notations relating to Young's experiment
根据部分相干光的传输理论,得到远场观察面 B 上场点 $Q(u, z, \omega)$ 的光谱为^[14]

$$S(u, z, \omega) = \left(\frac{k}{2\pi z}\right) \iint_{\Delta} W^{(0)}(x_1, x_2, z = 0, \omega) \times \exp\left[-\frac{ik}{z}u(x_2 - x_1)\right] dx_1 dx_2, \quad (2)$$

式中 k 为波数, u 为场点 $Q(u, z, \omega)$ 的横向坐标,上式积分区间 Δ 遍及双缝。

把(1)式代入(2)式可得

$$S(u, z, \omega) = \left(\frac{k}{2\pi z}\right) \iint_{\Delta} S^{(0)}(\omega) \exp\left[-\frac{(x_1 - x_2)^2}{2\sigma^2(\omega)}\right] \times \exp[-ikv(x_2 - x_1)] dx_1 dx_2, \quad (3)$$

* 激光技术国家重点实验室基金资助课题。

E-mail: badalu@scu.edu.cn

收稿日期: 2002-05-21

其中 $\nu = u/z$, 是场点 $Q(u, z, \omega)$ 对应双缝中心的衍射角。

假设源光谱 $S^{(0)}(\omega)$ 为洛伦兹型, 中心频率位于 ω_0 处, 有

$$S^{(0)}(\omega) = S_0 \frac{\Gamma^2}{(\omega - \omega_0)^2 + \Gamma^2}, \quad (4)$$

上式中 S_0 是正的常量, Γ 是源光谱谱宽。设空间相关长度 $\sigma(\omega)$ 为

$$\sigma(\omega) = \sigma_0 \frac{\omega_0}{\omega}, \quad (5)$$

σ_0 为对应源光谱中心频率 ω_0 处的相关长度, 这样的入射光束满足 Wolf 的“定标律”^[1]。

把式(4)和(5)代入(3)式, 并对 x_2 积分可以得到场点 $Q(u, z, \omega)$ 的光谱为

$$S(\nu, z, \omega) = S_0 \frac{\Gamma^2}{(\omega - \omega_0)^2 + \Gamma^2} \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \frac{\sigma_0 \omega_0}{2cz} \exp\left[-\frac{\nu^2 \sigma_0^2 \omega_0^2}{2c^2}\right] \times \left[\int_b^a H(x_1, \nu, \omega) dx_1 + \int_{-a}^{-b} H(x_1, \nu, \omega) dx_1 \right], \quad (6)$$

其中

$$H(x_1, \nu, \omega) = \operatorname{erf}\left[\frac{\omega c(a - x_1) + i\nu\sigma_0^2\omega_0^2}{\sqrt{2}c\sigma_0\omega_0}\right] - \operatorname{erf}\left[\frac{\omega c(-a - x_1) + i\nu\sigma_0^2\omega_0^2}{\sqrt{2}c\sigma_0\omega_0}\right] - \operatorname{erf}\left[\frac{\omega c(b - x_1) + i\nu\sigma_0^2\omega_0^2}{\sqrt{2}c\sigma_0\omega_0}\right] + \operatorname{erf}\left[\frac{\omega c(-b - x_1) + i\nu\sigma_0^2\omega_0^2}{\sqrt{2}c\sigma_0\omega_0}\right], \quad (7)$$

在(6)式和(7)式中, $c = \omega/k$ 是光速, erf 是误差函数。(6)式表明, 远场光谱由源光束的相关长度 σ_0 、谱宽 Γ 、场点的衍射角 ν 和双缝参量 a 和 b 共同决定。

3 远场轴上点的光谱变化

利用(6)式对远场光谱进行了数值计算, 典型计算结果总结于图 2 ~ 图 7。为讨论方便, 令缝参量 $\epsilon = b/a$ ($0 \leq \epsilon < 1$), 并且保持双缝外边缘间距 $2a$ 不变, 通过改变双缝内边缘间距 $2b$ 来达到使缝的宽度和间距变化的目的。缝参量 $\epsilon \rightarrow 1$ 和 $\epsilon = 0$ 分别对应忽略双缝尺寸和单缝的情况。

令 $\nu = 0$, 由(6)式得到轴上点的光谱变化情况。图 2 给出了不同缝参量 $\epsilon = 0.3, 0.8$ 的归一化光谱 $S(\omega) = S(z, \omega)/S_{\max}(z, \omega)$, 图中实线为 $z = 0$ 处入射的源光谱 $S^{(0)}(\omega)$ 。计算参量取为: $\Delta = \sigma_0/a = 2$ (相对空间相关度), $\omega_0 = 3.2 \times 10^{15}$ rad/s, $\Gamma =$

0.6×10^{15} rad/s, $a = 1$ mm, $z/z_0 = 10$, $z_0 = a^2/\lambda_0$ (λ_0 为源光谱中心波长)。由图 2 可以看出, 对 $\epsilon = 0.3$ 和 0.8 光谱均发生了光谱位移。

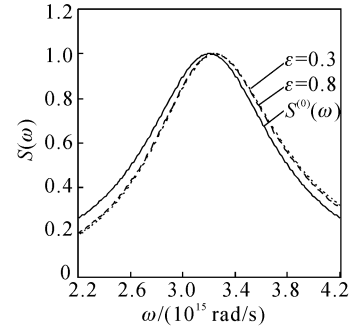


Fig. 2 Normalized on-axis spectra $S(\omega)$ for $\epsilon = 0.3$ and 0.8 . The calculation parameters are $\Delta = 2$, $\omega_0 = 3.2 \times 10^{15}$ rad/s, $\Gamma = 0.6 \times 10^{15}$ rad/s, $a = 1$ mm and $z/z_0 = 10$

定义相对光谱位移

$$\frac{\delta\omega}{\omega_0} = \frac{\omega_{\max} - \omega_0}{\omega_0}, \quad (8)$$

其中 ω_{\max} 是光谱 $S(\nu, z, \omega)$ 在 z 处的最大值 $S_{\max}(\nu, z, \omega)$ 所对应的频率。 $\delta\omega/\omega_0$ 大于零称为蓝移, 小于零称为红移。图 2 中对应 $\epsilon = 0.3$ 和 0.8 两种情况, 相对光谱位移分别为 0.014 和 0.012 , 均为蓝移。相对光谱位移 $\delta\omega/\omega_0$ 随双缝参量 ϵ 的变化情况如图 3 所示, 图中三条线分别对应相对相关度 $\Delta = 1, 2$ 和 4 , 其它参量保持不变。从图 3 中可以看出, 相关性较大时 (如 $\Delta = 4$ 和 2), $\delta\omega/\omega_0$ 随 ϵ 的变化比较缓慢, 并且随着 ϵ 增加是单调减小。当相关性减小时 (如 $\Delta = 1$), $\delta\omega/\omega_0$ 的变化不再是单调变化, 在 $0 \leq \epsilon \leq 0.54$ 区间, $\delta\omega/\omega_0$ 随着 ϵ 增加而减小; 而在 $0.54 < \epsilon < 1$ 区间 $\delta\omega/\omega_0$ 随着 ϵ 增加而增大。

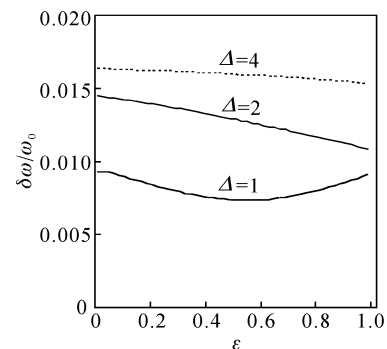


Fig. 3 The variation of normalized on-axis spectra $S(\omega)$ with slit parameter ϵ

不同相对相关度 $\Delta = 1$ 和 2 的归一化光谱 $S(\omega)$ 如图 4 所示。 $\epsilon = 0.5$, 其它参量与图 2 相同。由图 4 可

以看出,对 $\Delta = 1$ 和 2 光谱都发生了光谱位移,且均为蓝移,分别为 0.007 和 0.013。相对光谱位移 $\delta\omega/\omega_0$ 随相对相关度 Δ 的变化如图 5,参量与图 4 相同。可以看出, $\delta\omega/\omega_0$ 随 Δ 的变化不是单调变化,在 $0 < \Delta \leq 3$ 区间变化比较迅速;当 $\Delta > 3$ 时, $\delta\omega/\omega_0$ 随 Δ 增大而缓慢增加。

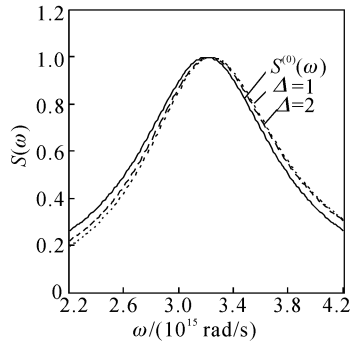


Fig. 4 Normalized on-axis spectra $S(\omega)$ for $\Delta=1$ and 2. The calculation parameters are $\epsilon=0.5$, $\omega_0=3.2 \times 10^{15}$ rad/s, $\Gamma=0.6 \times 10^{15}$ rad/s, $a=1$ mm and $z/z_0=10$

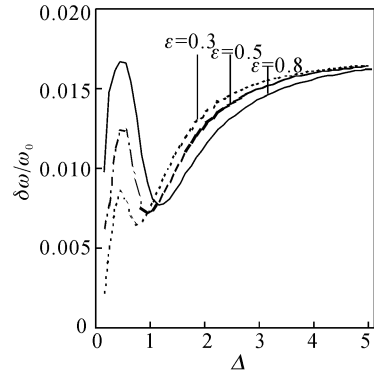


Fig. 5 The variation of normalized on-axis spectra $S(\omega)$ with relative spatial correlation Δ

4 远场轴外点的光谱变化

在(6)式中改变衍射角 ν ,可以研究轴外点光谱 $S(\nu, z, \omega)$ 的变化情况。图 6 中虚线为 $z=0$ 处入射的源光谱 $S^{(0)}(\omega)$,实线对应不同衍射角的光谱,且所有图都已归一化:

$$S(\omega) = S(\nu, z, \omega) / S_{\max}(\nu, z, \omega).$$

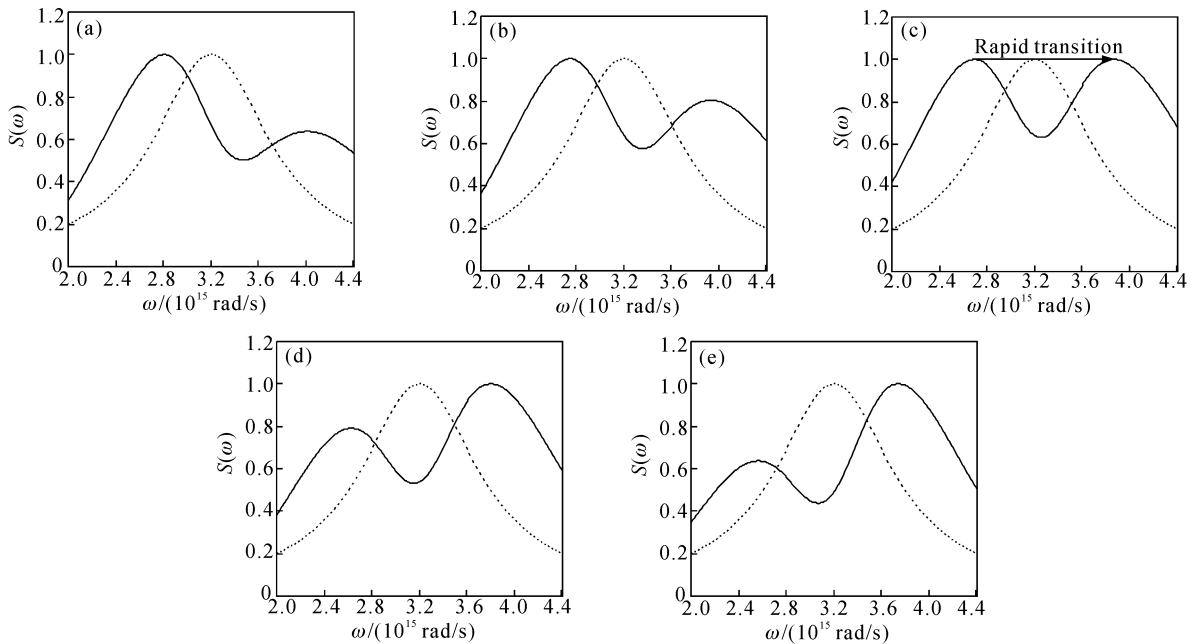


Fig. 6 The variation of normalized off-axis spectra $S(\omega)$ with ν . The calculation parameters are $\Delta=2$, $\omega_0=3.2 \times 10^{15}$ rad/s, $\Gamma=0.6 \times 10^{15}$ rad/s, $\epsilon=0.8$, $a=1$ mm and $z/z_0=10$. (a) $\nu=0.00046$; (b) $\nu=0.00047$; (c) $\nu=0.000478$; (d) $\nu=0.00049$; (e) $\nu=0.00050$: normalized source spectrum at the $z=0$ plane; —: normalized off-axis spectrum at ν

计算参量取为: $\Delta = 2, \omega_0 = 3.2 \times 10^{15}$ rad/s, $\Gamma = 0.6 \times 10^{15}$ rad/s, $\epsilon = 0.8, a = 1$ mm, $z/z_0 = 10$ 。由图 6(a)可以看出,在 $\nu = 0.00046$,光谱由一个峰分裂为两个峰(主峰和次峰),光谱位移为红移,相对光

谱位移 $\delta\omega/\omega_0 = -0.125$ 。当减小衍射角 ν ,红移增加,次峰的高度也随之增加[图 6(b)]。特别是当衍射角增加到 $\nu = 0.000478$ 时,双峰高度相等[图 6(c)],这意味着此时光谱位移有一个迅速的突变发

生,从红移跃变到蓝移,这种现象称为光谱开关^[5]。当 ν 继续增加时,光谱位移为蓝移,而且蓝移量随 ν 增加而减小[如图 6(d) 和图 6(e)],原来的次峰变为主峰。

与轴上点光谱会随缝参量和相关性变化一样,轴外点的光谱位移和光谱开关也随 ϵ 和 Δ 而变化。图 7 为光谱位移随 ν 的变化图。图 7(a) 中三条曲线分别对应 $\Delta = 1, 2$ 和 4 的情况,其它参量与图 6 相同。由图 7(a) 可以看出,对 $\Delta = 4$ 的情况,在 $0 \leq \nu \leq 0.00120$ 区间内,有 4 个光谱开关分别在 $\nu = 0.000153, 0.000473, 0.000808$ 和 0.001150 出现,相对光谱跃迁量分别为 0.653、0.438、0.313 和 0.241;对 $\Delta = 2$ 的情况,有 3 个光谱开关出现,相比

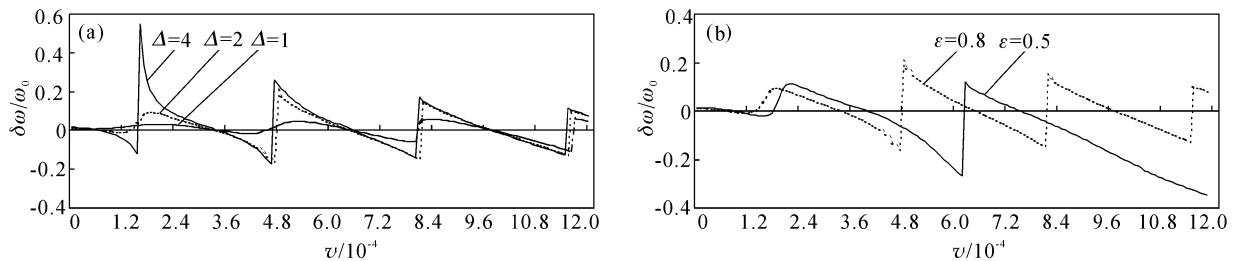


Fig. 7 Relative spectral shift $\delta\omega/\omega_0$ versus ν . (a) $\Delta = 1, 2, 4$ and $\epsilon = 0.8$; (b) $\epsilon = 0.5, 0.8$ and $\Delta = 2$

结论 本文从部分相干光的传输定律出发,对杨氏双缝实验的远场轴上和轴外点光谱的变化作了详细的数值计算和分析。研究表明,光谱位移和光谱开关在远场都可能出现。光谱开关与缝参量 ϵ 和源的相关度 Δ 有关, ϵ 和 Δ 越大,则光谱开关效应就越显著。与部分相干光照明的杨氏实验结果相比较^[9~11],本文主要特点是考虑了缝宽对光谱移动和光谱开关的影响,因此需要从一般的部分相干光的传输公式出发进行衍射积分的数值计算,而不能简单地用解析公式^[9~11]处理。与文献[12]相比较,本文得出了在杨氏实验的远场也可以出现光谱开关的重要结论。由于光谱开关在部分相干光照明的常见光学系统,如光阑^[5],光阑-透镜^[6,7,13]以及杨氏装置^[12]中都可能出现,并且可以通过改变光学系统参量和光束参量来改变光谱开关的位置和光谱跃迁的大小,因此,这类光谱跃变的效应可望在光互连、光通信等方面获得应用。

参 考 文 献

1 Wolf E. Invariance of the spectrum of light on propagation. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **56**(13): 1370 ~ 1372

$\Delta = 4$ 的情况,离轴最近的光谱开关消失;而对 $\Delta = 1$ 的情况,仅在 $\nu = 0.00116$ 处出现了光谱开关,相对光谱跃迁量为 0.170。由此可见在其它参量保持不变的情况下,入射光束的相关性对光谱的影响很大,对光谱开关尤其明显。另外,从图中也可看出,不同相对相关度 Δ 下,出现光谱开关的位置略有差异。图 7(b) 中两条曲线分别对应 $\epsilon = 0.5$ 和 0.8 的情况, $\Delta = 2$,其它参量与图 7(a) 相同。从图 7(b) 可以看出,对于 $\epsilon = 0.8$ 有三个光谱开关, $\epsilon = 0.5$ 有一个光谱开关出现。当双缝参量减小时,对应位置的光谱开关将离 z 轴越远,如对应 $\epsilon = 0.8$ 和 0.5,第一个光谱开关分别出现在 $\nu = 0.000478$ 和 0.000620 处。

2 Dacic Z, Wolf E. Changes in the spectrum of a partially coherent light beam propagating in free space. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1988, **5**(7):1118~1126

3 Foley J T. The effect of an aperture on the spectrum of partially coherent light. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1991, **8**(7):1099~1105

4 Palma C, Cincotti G, Guattari G. Spectral shift of a Gaussian Schell-model beam beyond a thin lens. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1998, **34**(2):378~383

5 Pu J, Zhang H, Nemoto S. Spectral shifts and spectral switches of partially coherent light passing through an aperture. *Opt. Commun.*, 1999, **162**(4):57~63

6 Pu J, Nemoto S. Spectral shifts and spectral switches in diffraction of partially coherent light by a circular aperture. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2000, **36**(12): 1407~1411

7 Pu J, Nemoto S. Spectral changes and $1 \times N$ spectral switches in the diffraction of partially coherent light by an aperture. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 2002, **19**(2):339~344

8 Kandpal H C. Experimental observation of the phenomenon of spectral switch. *J. Opt. (A): Pure Appl. Opt.*, 2001, **3**(4):296~299

9 James D F V, Wolf E. Some new aspects of Young's interference experiment. *Phys. Lett. (A)*, 1991, **157**(1): 6~10

10 Kandpal H C, Vaishya J S, Chander M. Spectral changes due to source correlation in Young's interference experiment. *Phys. Lett. (A)*, 1992, **167**(2):114~119

11 Ponomarenko S A, Wolf E. Coherence properties of light

- in Young's interference pattern formed with partially coherent light. *Opt. Commun.*, 1999, **170**(10):1~8
- 12 Pan L, Lü B. The spectral switch of partially coherent light in Young's experiment. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2001, **37**(11):1377~1381
- 13 Lü B, Pan L. Spectral switching of Gaussian-Schell model beams passing through an aperture lens. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2002, **38**(4):340~344
- 14 Friberg A T, Sudol R J. The spatial coherence properties of Gaussian Schell-model beams. *Optics Acta*, 1983, **30**(11):1075~1097
- 13 Lü B, Pan L. Spectral switching of Gaussian-Schell

Spectral Shifts and Spectral Switches in Young's Experiment at the Far Zone

Pan Liuzhan^{1,2} Lü Baida^{1,3}

$\left. \begin{array}{l} 1 \text{ Institute of Laser Physics \& Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064} \\ 2 \text{ Department of Physics, Luoyang Normal College, Luoyang 471022} \\ 3 \text{ State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University} \\ \text{of Science \& Technology, Wuhan 430074} \end{array} \right\}$

(Received 21 May 2002)

Abstract: Starting from the propagation law of partially coherent light, spectral changes in Young's two-slit experiment with Schell model beams are studied. That the spectral switches in Young's experiment at far zone can also take place is pointed out. The spectral switch effect, which is physically attributed to the diffraction by the slits and spatial coherence of light, increases with increasing slit parameter ϵ and source spatial correlation Δ . Detailed numerical results are given to illustrate the behavior of spectral shifts and spectral switches in Young's experiment and a comparison with previous work is also made.

Key words: physical optics; Young's experiment; partially coherent light; spectral shift; spectral switch