

基于 GUI 的可视化双光束干涉实验仿真^{*}

王 琪 吴 晓

(浙江外国语学院跨境电子商务学院 浙江 杭州 310012)

(收稿日期:2019-02-20)

摘 要:基于理论计算结果,应用 MATLAB GUI 仿真软件,设计出简洁易操作的 s-s 双光束干涉现象的可视化动态图像.理论研究发现,干涉光束波长、入射角和方位角对 s-s 双光束干涉后的强度分布沿 x, y, z 方向的周期性有影响.通过 GUI 对各参数进行设置,可以将干涉后强度的分布情况直观而又形象地呈现出来.

关键词:双光束干涉 MATLAB GUI 可视化 干涉参数

近年来,一维、二维或三维功能性的微纳周期性结构已在光电子的诸多领域获得广泛的应用^[1~5],例如偏光器、光滤波器、光耦合器、分布反馈式激光器、光子晶体等.微纳周期性结构的制作方法包括了激光束直写方法、X 射线光刻、深度 UV 光刻,以及激光干涉技术等^[6~9].与其他技术相比,多光束激光干涉技术具有可以在短时间内实现大面积、均匀的周期性结构且实验成本较低等优势,已被广泛应用.

在物理教学过程中,光学干涉实验在对光的波动性理解中有着重要的作用.由于激光干涉后的强度受到多个干涉参量的影响^[10~13],包括干涉光束数目、各相干光束的强度分布,以及相干光的入射角 θ ,方位角 α ,偏振态分布,如图 1 所示.因此,在传统的教学模式中,会选择 MATLAB 软件对干涉后强度分布进行模拟,但每次只限于各参数已设置的基础上进行,不能直观地看到各参数对干涉后强度分布的影响.近年来 MATLAB GUI 仿真软件,因其具有良好的交互性、实用性和可扩展性,并可以提供良好的人机交互能力,可以让研究者形象直观地看到结果,已被大量应用到各类仿真实验研究^[14~17].

本文将利用 MATLAB GUI 对 s-s 偏振组合干

涉后的强度分布进行仿真研究.利用 GUI 中的滑条及数据框设置,研究当两束干涉光强度相同时,将直观仿真干涉光的波长、入射角和方位角对干涉后强度沿 x 轴方向和二维(2-dimension, 2D)、三维(3-dimension, 3D)分布的影响,实现整个实验的可视化且图样形象逼真.

1 s-s 双光束干涉基本理论

两束相干光在三维空间相遇时,将在叠加区内因波的叠加而引起强度重新分布,即发生双光束干涉现象.图 1 为双光束干涉示意图.其中两束光均为 s-偏振态, θ_1, θ_2 和 α_1, α_2 分别代表了两束相干光传播方向与 z 轴和 x 轴正方向的夹角.

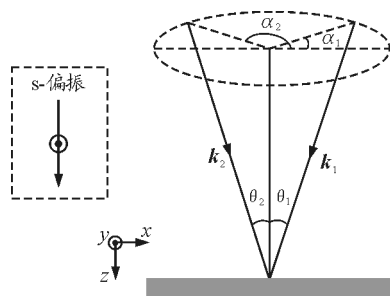


图 1 双光束干涉示意图

两列相干光波波数为 $k_1 = k_2 = k = \frac{2\pi}{\lambda}$, 入射角

^{*} 2018 年浙江省教育厅一般科研项目.

作者简介:王琪(1998-),女,在读本科生.

通讯作者:吴晓(1985-),女,博士,讲师,主要从事激光干涉技术研究.

$\theta_1, \theta_2 \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$, 方位角 $\alpha_1, \alpha_2 \in [0, \pi]$. 假设两束光束均表示为平面波, 那么, 它们的电场 $\mathbf{E}_1(\mathbf{r}, t)$ 和 $\mathbf{E}_2(\mathbf{r}, t)$ 可以表示为

$$\begin{aligned}\mathbf{E}_1(\mathbf{r}, t) &= \text{Re}[E_{01} \exp[i(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - \omega t)] \mathbf{e}_1] \\ \mathbf{E}_2(\mathbf{r}, t) &= \text{Re}[E_{02} \exp[i(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \omega t)] \mathbf{e}_2]\end{aligned}\quad (1)$$

其中 ω 表示频率, 且它们的初始相位均为零; $\mathbf{r}$ 是在干涉区域的位置矢量; $E_{0n} (n=1, 2, 3)$ 是每束光的电场幅度; $\mathbf{e}_n (n=1, 2, 3)$ 是对应光的偏振态单位矢量. 那么, 干涉后总电场的分布为

$$\begin{aligned}\mathbf{E}_T(\mathbf{r}, t) &= \\ \text{Re}[(E_{01} e^{i\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}} \mathbf{e}_1 + E_{02} e^{i\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}} \mathbf{e}_2) e^{-i\omega t}]\end{aligned}\quad (2)$$

干涉后的强度分布可表示为

$$I_T = \langle \mathbf{E}_T^* \cdot \mathbf{E}_T \rangle_t \propto \sum_{n=1}^2 E_{0n}^2 + \quad (3)$$

$$\text{Re}\{E_{01} E_{02} [e^{i(\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_1) \cdot \mathbf{r}} \mathbf{e}_1^* \cdot \mathbf{e}_2 + e^{i(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{r}} \mathbf{e}_2^* \cdot \mathbf{e}_1]\}$$

沿着 z 轴传播的偏振光, 初始波矢可表示为 $\mathbf{k}_0 = (0 \ 0 \ k)^+$ (其中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$), 同时干涉光束的偏振性质可以用 Jones 矩阵描述, 对于 S-S 双光束, 其 Jones 矩阵表示为 $\mathbf{J}_1 = \mathbf{J}_2 = (0 \ 1 \ 0)^+$.

应用旋转矩阵

$$R(\theta_n, \alpha_n) = \begin{pmatrix} \cos \alpha_n \cos \theta_n & -\sin \alpha_n & \cos \alpha_n \sin \theta_n \\ \sin \alpha_n \cos \theta_n & \cos \alpha_n & \sin \alpha_n \sin \theta_n \\ -\sin \theta_n & 0 & \cos \theta_n \end{pmatrix}$$

可以得到干涉时, 每束光的波矢和偏振态的单位矢量分别表达为 $\mathbf{k}_n = R_n \mathbf{k}_0$ 和 $\mathbf{e}_n = R_n \mathbf{J}_n$. 即

$$\mathbf{k}_1 = R(\theta_1, \alpha_1) \mathbf{k}_0 =$$

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha_1 \cos \theta_1 & -\sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 \sin \theta_1 \\ \sin \alpha_1 \cos \theta_1 & \cos \alpha_1 & \sin \alpha_1 \sin \theta_1 \\ -\sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ k \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha_1 \sin \theta_1 \\ \sin \alpha_1 \sin \theta_1 \\ \cos \theta_1 \end{pmatrix} k$$

$$\mathbf{e}_1 = R(\theta_1, \alpha_1) \mathbf{J}_1 =$$

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha_1 \cos \theta_1 & -\sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 \sin \theta_1 \\ \sin \alpha_1 \cos \theta_1 & \cos \alpha_1 & \sin \alpha_1 \sin \theta_1 \\ -\sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin \alpha_1 \\ \cos \alpha_1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

同理可得 $\mathbf{k}_2, \mathbf{e}_2$, 假设 $E_{01} = E_{02} = A$. 将以上结果代入式(3), 可以得到

$$\begin{aligned}I_T &\propto 2A^2 + 2A^2 \cos[(\cos \alpha_2 \sin \theta_2 - \cos \alpha_1 \sin \theta_1)kx + \\ &\quad (\sin \alpha_2 \sin \theta_2 - \sin \alpha_1 \sin \theta_1)ky + \\ &\quad (\cos \theta_2 - \cos \theta_1)kz] \cdot \\ &\quad (\sin \alpha_1 \sin \alpha_2 + \cos \alpha_1 \cos \alpha_2)\end{aligned}\quad (4)$$

由式(4)可得, 干涉后强度分布沿 x, y, z 方向均具有周期性, 其周期大小, 分别为

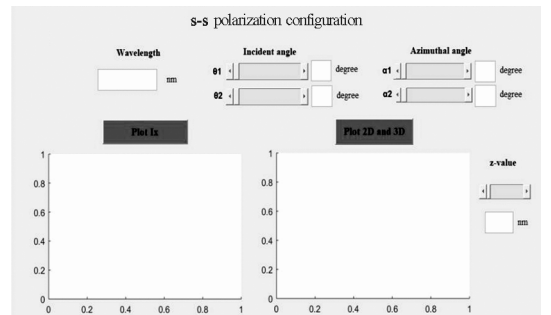
$$\begin{cases} d_x = \frac{\lambda}{\cos \alpha_2 \sin \theta_2 - \cos \alpha_1 \sin \theta_1} \\ d_y = \frac{\lambda}{\sin \alpha_2 \sin \theta_2 - \sin \alpha_1 \sin \theta_1} \\ d_z = \frac{\lambda}{\cos \theta_2 - \cos \theta_1} \end{cases}\quad (5)$$

与干涉光束的波长、入射角和方位角有关.

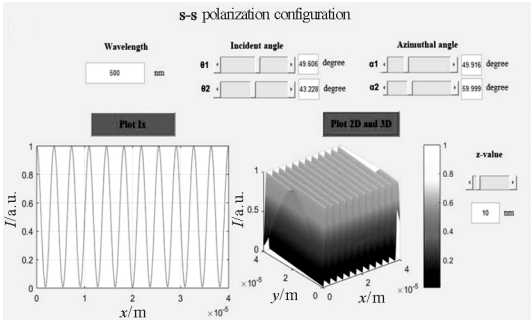
2 GUI 设计

2.1 GUI 布局

首先创建一个新的 GUI 界面, 需要将组件进行适当的布局, 如图 2(a) 所示, 包含 15 个静态文本框 (Static text)、2 个坐标轴 (Axes)、2 个按钮 (Push Button)、6 个文本框 (Edit text)、5 个滑动条 (Slider). 干涉光束的波长可直接输入, 两个入射角及方位角可通过移动滑动条进行设置 (同时相应的数据会在文本框中显示). 点击“Plot I_x ”和“Plot 2D and 3D”将在对应下方的方框中得到双光束干涉后强度沿 x 方向周期性分布的图样 (I_x), 以及 2D/3D 图像, 如图 2(b) 所示. 根据式(4)可以发现, 干涉后强度分布在两个入射角不相等条件下, 还与 z 的取值有关, 因此, 界面还通过设置滑动条来对 z 进行取值, 从而可观察光强空间分布动态变化.



(a) GUI 界面设计图



(b) 通过输入或移动滑块设置波长、入射角和方位角，以及 z 得到的干涉后强度沿 x 轴方向和2D/3D分布图

图 2 GUI 设计

2.2 核心代码

本程序中的核心代码为两个仿真实验按钮的 Callback 函数，即绘制双光束干涉后光强的 I_x 和 2D/3D 分布的图像程序命令：

```
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles);  
  
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles);
```

3 仿真结果

当两干涉光束对称分布($\theta_1=\theta_2=\theta, \alpha_1=0^\circ, \alpha_2=180^\circ$)时,由式(4)可以得到,干涉现象只出现在 x 轴方向上,且周期 $d_x = \frac{\lambda}{2\sin \theta}$. 通过 GUI 仿真,可以直观地看到沿 x 轴方向的干涉现象以及其周期随着波长的变化,如图 3 所示.

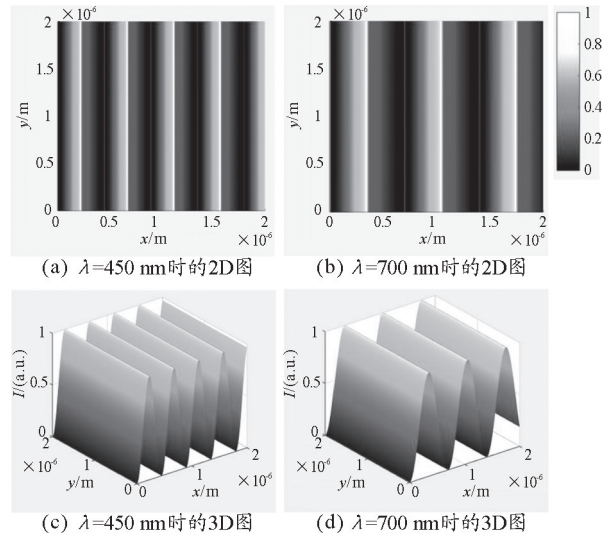


图 3 利用 MATLAB GUI 实现当 $\theta_1 = \theta_2 = \theta = 30^\circ$, 干涉后强度的 2D 和 3D 仿真模拟结果

为研究入射角对干涉后强度分布的影响,设 $\alpha_1 = 0^\circ, \alpha_2 = 180^\circ, \theta_1 \neq \theta_2$, 根据式(4) 可得

$$d_x = \frac{\lambda}{\sin \theta_2 + \sin \theta_1}$$
$$d_z = \frac{\lambda}{\cos \theta_2 - \cos \theta_1}$$

即干涉后强度分布的周期性出现在 x 和 z 两个方向. 因此,当选取不同 z 值时,虽然周期性 d_x 不变,但是干涉后强度的最大和最小值沿 x 轴方向分布空间发生了变化,如图 4 所示.

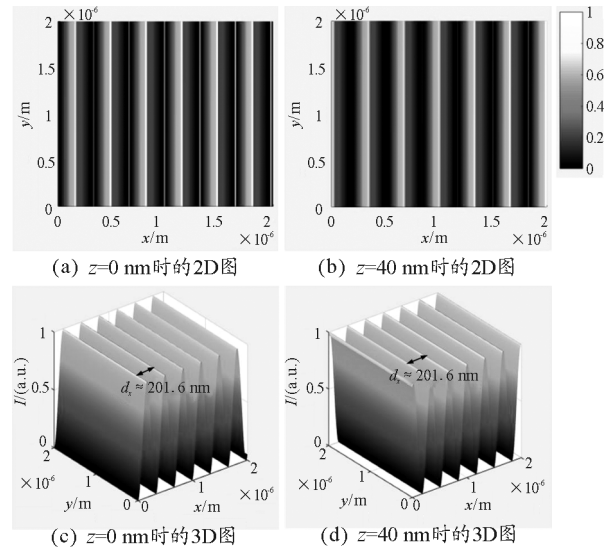
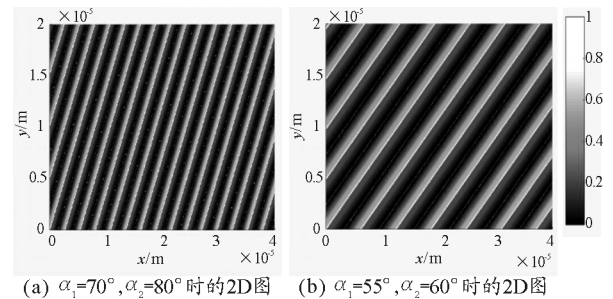


图 4 利用 MATLAB GUI 实现当 $\lambda = 450 \text{ nm}, \theta_1 = 30^\circ, \theta_2 = 60^\circ$ 对应的干涉后强度的 2D 和 3D 仿真模拟结果

研究方位角对干涉后强度分布的影响,设 $\theta_1 = \theta_2 = \theta, \alpha_1 - \alpha_2 \neq 180^\circ$, 可得干涉后强度分布图像如图 5 所示. 此时干涉现象同时出现在 x 和 y 方向,且有

$$d_x = \frac{\lambda}{\sin \theta (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1)}$$
$$d_y = \frac{\lambda}{\sin \theta (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1)}$$

从图中可发现,方位角对 x, y 方向的周期性均有影响.



(a) $\alpha_1=70^\circ, \alpha_2=80^\circ$ 时的 2D 图 (b) $\alpha_1=55^\circ, \alpha_2=60^\circ$ 时的 2D 图

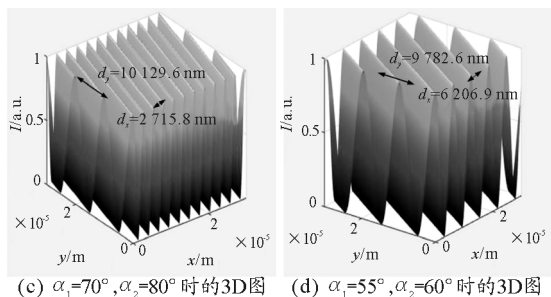


图 5 利用 MATLAB GUI 实现当 $\lambda = 450 \text{ nm}$, $\theta_1 = \theta_2 = 80^\circ$ 对应的干涉后强度的 2D 和 3D 仿真模拟结果

4 结束语

随着干涉技术应用的越来越广泛,干涉理论的研究继续进一步的完善,在物理教学中难度相对较大的光学实验,通过 MATLAB GUI 的界面设置与编程,不仅使光强分布可视化,而且还实现了各个参数的可调性,将不同参数下的实验结果直观地显示出来,有助于学生比较理解各参数对光强分布的影响. 本文通过应用 MATLAB GUI 仿真软件对于 s-s 双光束干涉进行了较为详细的研究. 通过程序设置,最终实现了可以动态观察到干涉光束的波长、入射角和方位角对干涉后强度分布的影响. 此外,该程序还可生成 .exe 文件,方便操作. 这种直观便捷的动态实验方法,为物理光学实验教授课程提供了很大的帮助. 该研究也为今后应用和实现其他偏振态组合的双光束干涉和多于两束光束的干涉等工作做好基础.

参考文献

- 1 S. K. Tripathy, N. K. Viswanathan, S. Balasubramanian, et al. Holographic fabrication of polarization selective diffractive optical elements on azopolymer film, Polym. Adv. Technol., 2000, 11(8 ~ 12): 570 ~ 574
- 2 T. Alasaarela, D. Zheng, L. Huang, et al. Single - layer one - dimensional nonpolarizing guided - mode resonance filters under normal incidence, Opt. Lett., 2011, 36(13): 2411 ~ 2413
- 3 J. Paterson, A. Natansohn, P. Rochon, et al. Optically inscribed surface relief diffraction gratings on azobenzene-containing polymers for coupling light into slab waveguides, Appl. Phys. Lett., 1996, 69(22): 3318 ~ 3320
- 4 L. M. Goldenberg, V. Lisinetskii, Second order DFB lasing using reusable grating inscribed in azobenzene - containing material, Optical Materials Express, 2012, 2(1), 11 ~ 19
- 5 Lai N D, Liang W P, Lin J H, et al. Fabrication of two - and three - dimensional periodic structures by multi - exposure of two - beam interference technique, Optics Express, 2005, 13(23): 9605 ~ 11
- 6 Ebendor - Heidepriem H. Laser Writing of Waveguides in Photosensitive Glasses. Opt. Mater. 2004, 25: 109 ~ 115
- 7 Romanato F., Businaro L., Fabrizio E. D. et al.. Fabrication by Means of X - ray Lithography of Two Dimensional GaAs/AlGaAs Photonic Crystals with an Unconventional Unit Cell. Nanotechnol, 2002(13): 644 ~ 652
- 8 Bogaerts W., Wiaux V., Taillaert D. et al.. Fabrication of Photonic Crystals in Silicon - on - insulator Using 248 - nm Deep UV Lithography. IEEE J. Select. Topics Quantum Electron, 2002(8): 928 ~ 934
- 9 Xuan M. D., Dai L. G., Jia H. Q. et al. Fabrication of Large - area Nano - scale Patterned Sapphire Substrate with Laser Interference Lithography. Optoelectron. Lett., 2014(10): 0051 ~ 0054
- 10 吴晓. 偏振态对三光束激光干涉分布的影响. 光学学报, 2015, 35(10): 120 ~ 124
- 11 Wang D, Wang Z, Zhang Z, et al. Effects of polarization on four - beam laser interference lithography. Applied Physics Letters, 2013, 102(8): 081903
- 12 Zhang J, Wang Z, Di X, et al. Effects of azimuthal angles on laser interference lithography. Applied Optics, 2014, 53(27): 6294 ~ 301
- 13 马丽娜, 张锦, 蒋世磊, 等. 入射光束角度及强度偏差对多光束干涉光刻结果的影响. 光子学报, 2015, 44(10)
- 14 徐春芳, 王浩然, 王建岗, 等. 基于 MATLAB 的多光学现象仿真可视化设计. 大学物理实验, 2016, 29(4): 86 ~ 88
- 15 袁志伟, 向少华. 基于 MATLAB 的光学演示实验仿真. 怀化学院学报, 2011, 30(s1): 28 ~ 31
- 16 李海涛, 苏艳丽, 姜其畅. MATLAB GUI 在光学实验教学中的应用. 大学物理实验, 2017, 30(6)
- 17 张光斌, 王冰雪. 基于 Matlab GUI 的物理演示实验设计. 物理通报, 2017, 36(7): 99 ~ 102