

Matlab 软件在“微纳光子学”课程教学中的应用

程书博 刘孟思 田永红 陈善俊*

长江大学物理与光电工程学院

DOI:10.12238/mef.v5i7.5652

[摘要] “微纳光子学”课程介绍了微纳尺度上光学及光子学的新现象与新技术,着重讨论在微纳尺度上的光与物质相互作用的规律及光的产生、传输、调制、探测等方面的应用。在微纳光子学这门课程的教学过程中,灵活地利用 Matlab 软件解释一些基本理论,并以模拟仿真的形式直观地展示光场的动态调控及其轴向衍射特性能够帮助学生更深刻地了解相关概念和相关微纳光子器件的构造方式。“微纳光子学”课程与 Matlab 软件的结合能够使学生更加容易接受这门课程,也使得这门课程的教学不再枯燥乏味,从而进一步激发学生的学习热情。

[关键词] Matlab 软件; 微纳光子学; G-S 算法; 波带片

中图分类号: O436.1

文献标识码: A

The Application of Matlab Software in the Teaching of "Micro- and Nano-Photonics"

CHENG Shubo, LIU Mengsi, TIAN Yonghong, CHEN Shanjun*

Yangtze University School of Physics and Optoelectronic Engineering

[Abstract] The "Micro- and Nano-Photonics" course introduces the new phenomena and technologies of optics and photonics on the micro and nano-scale, and focuses on the law of the micro- and nano-scale interaction between the light and matter and the application of light generation, transmission, modulation, detection and so on. In the course teaching, the flexible use of Matlab software to explain some basic theories, and intuitive display of the dynamic modulation of light field and its axial diffraction characteristics in the form of simulation can help students understand the relevant concepts and the specific construction of micro- and nano-photonics devices better. The combination of "Micro- and Nano-Photonics" course and Matlab software can make it easier for students to understand this course, and make the teaching of this course no longer boring, so as to further stimulate students' learning enthusiasm.

[Key words] Matlab software; micro- and nano-photonics; G-S algorithm; Zone plate

引言

Matlab是一款基于矩阵进行数值计算的工程软件,因为其计算高效、界面友好及交互性强等优点被广泛应用于信号处理与通讯、图像存储与传输、信号检测、新算法研究与开发等领域。近些年,Matlab 也被广泛应用于信息光学、工程光学、数值分析、信号与系统、控制工程、光学设计及光电子学等非数学类课程中。长江大学物理与光电工程学院从2020年开始,为研究生开设了“微纳光子学”这门课程,微纳光子学是当前光学学科发展最活跃的前沿之一,其结合了光子学与纳米技术的前沿成果,主要优点是能在局域电磁相互作用的基础上实现许多全新的功能,成为21世纪国家不可或缺的关键科学和技术,也是目前新型光电子产业的重要发展方向,并在光通信、光互联、光存储、传感成像、传感测量、显示、固体照明、生物医学、安全、绿色能源等领域起到不可替代的作用。这门课程的

一些内容,例如光束的传播、光信息传输、图像存储、生物成像、超分辨、超表面等,不能很直观地展示其基本原理与应用。为了让学生能够更深刻地了解这些科研方向,我们在课程教学中结合科研方向,用Matlab软件编辑相应的程序语言来进行直观地展示。在教学过程中,学生不仅提高了学习的兴趣,还会主动提出一些问题,有的同学还会基于我们编写的程序进行改进,进而实现一些特殊功能。这种教学方法让学生掌握了科研的一些方法,提升了学生的科研素养。在本文中,我们以Matlab软件在微纳光子学元件结构设计课堂教学中的应用为例来说明该软件在“微纳光子学”教学中的辅助作用。

1 Matlab软件在微纳光子学元件的课堂教学中的应用

“微纳光子学”课程涉及波带片、光子筛、X射线成像等,作为一种新型衍射光学元件,一些新型波带片在光镊技术、低像差成像等领域有着广泛应用。为了让学生能够深入了解波带

片的构造过程, 在课程教学中我们将波带片的构造函数用 Matlab 软件写成程序语言, 通过运行程序能够很直观地展示相应波带片的结构。通过模拟仿真使得学生不再停留在枯燥的 Matlab 语言基础理论的学习上, 让学生能够利用编程语言工具来解决自己本专业的问题, 激发了学生对前沿科技的兴趣。

本文以 Thue-Morse 波带片为例, 展示在教学过程中如何基于 Matlab 软件实现新型波带片的构造。基于 Thue-Morse 序列的波带片用两个元素“*A*”和“*B*”, 其中“*A*”表示透光环带, “*B*”表示不透光环带, 再根据 Thue-Morse 序列的递推规则构造出 Thue-Morse 波带片, 递推规则为: $A \rightarrow AB, B \rightarrow BC$ 。第一级 Thue-Morse 二值非周期序列可表示为 $S_1=AB$; 第二级 Thue-Morse 二值非周期序列可表示为 $S_2=ABBA$; 其他级次 Thue-Morse 二值序列可按照相同递推规得到。Thue-Morse 非周期波带片的构造可依据相应的透过率函数来完成, 如(1)式。

$$q(\zeta) = \sum_{j=1}^{2^n} t_{n,j} \cdot \text{rect} \left[\frac{\zeta - (j-1/2) \cdot d_s}{d_s} \right] \quad (1)$$

其中, $q(\zeta)$ 为 Thue-Morse 非周期波带片的二维矩阵表达式, $\zeta = [0, 1]$, 在公式(1)中, $t_{n,j}$ 为传输值, 与上述第 n 级的 Thue-Morse 非周期序列中的第 j 个字母的类别有关, 当数字为“*A*”时, $t_{n,j}$ 等于 1, 当数字为“*B*”时, $t_{n,j}$ 等于 0, $t_{n,j} = 1$ 时波带为透光带, $t_{n,j} = 0$ 时波带为不透光带。

基于 Matlab 软件将公式(1)所示透过率函数写成程序代码如下:

```
clear all; close all; clc;
N=[1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1];%N=[1, 0, 0, 1, 0,
1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0];
NUM=1080;pixel=6.4e-6;a=NUM*pixel/2;TMZPO=zeros(NUM, NUM);
lambda=0.532e-6; %入射光波长
for j=1:16 % 第五级Thue-Morse序列条件下, j=1:32
for m=1:NUM
for n=1:NUM
cx=m-round(NUM/2)-1;
cy=n-round(NUM/2)-1;
r=sqrt(cx^2+cy^2)*pixel;
ds=1/(16); % 第五级Thue-Morse序列条件下,
ds=1/(32)
CB(m, n)=N(j)*rect(((r/a)^2-(j-1/2)*ds)/ds);
% 透过率函数
end
end
```

```
TMZPO=TMZPO+CB;
end
for mx=1:NUM
for my=1:NUM
if TMZPO(mx, my)==0
TMZPO(mx, my)=0;
else
TMZPO(mx, my)=1;
end
end
end
figure;imagesc(TMZPO); axis square;colormap(gray);
axis off;
```

将此程序保存为 Zone_plate.m 文件, 然后点击运行“运行”按钮, 运行结果如下: 图1(a)展示了对应第四级的 Thue-Morse 非周期波带片, 图1(b)展示了对应第五级 Thue-Morse 非周期波带片。从两图中, 学生可以明显看出 Thue-Morse 波带片的结构特点, 通过程序语言的编写能够进一步了解该类型波带片的波带沿径向的分布特性。

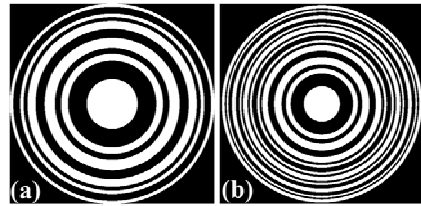


图1(a)基于第四级 Thue-Morse 非周期序列的波带片图1(b)基于第五级 Thue-Morse 非周期序列的波带片

波带片最重要的一个应用就是聚焦成像, 如何分析光束经过波带片聚焦后的传播特性尤为重要, 在教学过程中学生需要利用菲涅尔近似理论、角谱传播理论等标量衍射理论计算光场的空间分布。但是, 在先前的教学过程中我们发现学生对公式的推导比较排斥, 对于相关基础理论知识的学习兴趣缺乏。在“微纳光学”的教学中, 我们将标量衍射过程写成程序语言, 一方面让学生能够直观地看到光场的空间分布, 另一方面学生在编程的过程中能够对衍射理论有一个更深层次的理解。我们以第五级的 Thue-Morse 波带片为例, 通过编写程序来展示课堂教学中如何利用角谱理论直观展示单色平面波照射 Thue-Morse 波带片后的轴向强度分布, 在运用 Matlab 模拟时, 由“1”和“0”组成的序列放到矩阵里, 然后, 利用角谱衍射理论可得到:

$$E = iFT \left[FT(T)H \right] \quad (2)$$

式中, E 为振幅型波带片的复振幅, FT 表示傅里叶变换, iFT 表示傅里叶逆变换, 为传递函数, 可以写成:

$$H(x, y) = \exp \left[i2\pi z \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - \left(\frac{x}{d}\right)^2 - \left(\frac{y}{d}\right)^2} \right] \quad (3)$$

其中, z 为光沿轴向传播的距离, d 为波带片的最大宽度。运用MATLAB来模拟波带片的衍射特性, 程序中取入射光的波长 $\lambda = 532\text{nm}$, 波带片的最大宽度 d 为1080个像素, 每个像素的面积为 $8 \times 8 \mu\text{m}^2$ 。在上述基础上, 我们引导学生编写的程序如下:

```

lamda=0.532E-6;f=a^2/(lamda*s);%1/4a^2f=433.1^AAx
mm=-NUM/2:NUM/2-1;
nn=-NUM/2:NUM/2-1;
[mm,nn]=meshgrid(mm,nn);
M=800;%E;1aEU,oaCDAe
int3d=zeros(M,NUM);
center02d=zeros(1,M);
center2d=zeros(1,M);
z=zeros(1,M);
u=zeros(1,M);%OAA'ae.Aa xoeuOm
uu0=2*lamda;%13.8586Ax
uu1=a^2;
uu2=uu1/uu0;
for mm0=1:M
dist=4*mm0*f/M;%1ahpxo x/4t,
hpz=exp(1i*2*pi*dist*sqrt(1/(lamda)^2-(mm/(NUM*pixel)
el)).^2-(nn/(NUM*pixel)).^2));%
fr=ifft2(fftshift((fftshift(fft2(exp(1i*TMZP0))))).*hpz
));%«Ymu/2distA/2AAI»OAf-1/2CAE xAU
ax=(abs(fr)).^2;
int3d(mm0,:)=ax(NUM/2+1,:);%E;O»DDOm f-,©EO
center02d(1,mm0)=ax(NUM/2+1,NUM/2+1);
%OyDòCz;1EÖm
center2d(1,M-mm0+1)=ax(NUM/2+1,NUM/2+1);%u'DòCz;1EÖm
z(1,mm0)=dist;%uYÔd'a xoe
u(1,M-mm0+1)=uu2/dist;%uY'4d'a xoe
end
figure(1);colormap(jet);imagesc(int3d. '); axis
square;axis([0 M 210 300]);
xlabel('z/m','FontSize',16);
ylabel('x/pixel','FontSize',16);
set(gca,'LineWidth',2)
set(gca,'FontSize',16,'fontname','Times New
Roman','FontWeight','bold')
axis square;
center2dd=center2d/max(center2d);
figure(2);
plot(u,center2dd,'b','linewidth',2);%OáiOmY'4dA/2
3/4ü·Ö²/41/4
axis([2 s-2 0 1]);
xlabel('u','FontSize',16);
ylabel('eO»»Cz;1EÖT','FontSize',16);

```

```

set(gca,'LineWidth',2)
set(gca,'FontSize',16,'fontname','Times New
Roman','FontWeight','bold')
axis square;

```

将此程序保存为Intensity.m文件, 然后点击“运行”按钮, 运行结果如下: 图2(a)中的横坐标表示简化后的坐标, 纵坐标表示轴向光强分布。从图2(a)中学生能够清楚地看出, 与大学物理光学课程中的具有单个主焦点的菲涅尔波带片相比, 这类型波带片具有多个等强度且对称分布的主焦点, 且具有较大焦深, 能够减小成像像差。

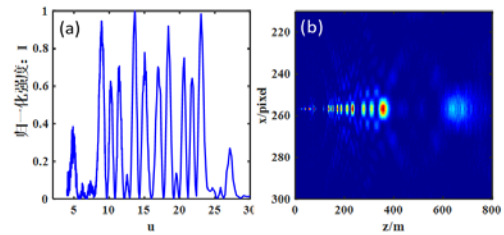


图2(a)第五级Thue-Morse非周期波带片轴向归一化衍射强度分布 图2(b)轴向强度纵切面图

2 结语

本文将Matlab软件应用于“微纳光子学”的教学中, 以微纳光子学元件的设计为例, 通过编写相应的程序, 直观地让学生对光场的传输、傅里叶变换等典型信息光学知识有了更深入的了解, 同时通过程序的运行让学生对微纳光子学元件的结构设计有了进一步理解, 更重要的是通过这种形式的教学能够让学生将所学的软件应用到具体的专业问题的处理中, 激发了学生的学习兴趣, 加深了学生对相关基础知识的理解, 提高了学生参加科研学习的兴趣, 从而提高该门课程的教学效果。

基金项目:

教育部产学合作协同育人项目(编号: 220603117263028)。

参考文献

[1]吕文华.MATLAB在信息光学教学中的应用[J].潍坊学院学报,2007(6):153-155.
 [2]韩振海,贺德春.MATLAB在波动光学教学中的应用[J].河西学院学报,2005(6):126-128.
 [3]李潮越,曹清,程长杰,等.产生空心高斯光束的改进型菲涅尔波带片[J/OL].激光与光电子学进展,2022-07-18.https://kn.s.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20220714.1332.419.html
 [4]杨志黎,移乃琴,程书博,等.广义Thue-Morse波带片的轴向衍射特性[J].长江大学学报(自然科学版),2020,17(5):103-108.

作者简介:

程书博(1986-),男,汉族,河南信阳人,博士,副教授,主要研究方向:微纳光子器件、光束整形及光镊技术等。

*通讯作者:

陈善俊(1982-),男,汉族,湖北十堰人,博士,副教授,主要从事团簇物理及纳米材料、光电材料与器件的实验与理论研究。