

文章编号: 0253-2239(2007)08-1485-5

光折变介质中空间光孤子自弯曲现象研究^{*}

董亮伟^{1,2} 马利红^{1,2} 王 辉²

(¹ 浙江师范大学数理与信息工程学院, 金华 321004)
(² 浙江师范大学信息光学研究所, 金华 321004)

摘要: 光折变非线性介质在外加直流电压时会引起介质内部电荷移动, 而移动后的电荷又会导致空间电荷的扩散效应, 从而产生非局域非线性现象。从理论上研究了具有流动和扩散非局域非线性的光折变晶体中所支持的空间光学孤子的传播行为。应用等效粒子近似方法分析了这类介质中(1+1)维空间光学孤子动力学行为, 得出孤子运动“加速度”显式解。孤子的有效“加速度”决定于孤子参量和光折变非局域参量。所得的解析结果可在一定参量范围内直接用来计算孤子的传播轨迹。对孤子在光折变非局域非线性作用下的传播动力学行为做了仿真模拟, 数值模拟结果与理论分析结论符合得很好。

关键词: 非线性光学; 光与物质相互作用; 等效粒子近似方法; 空间孤子
中图分类号: O437 文献标识码: A

Self-Bending Effect of Spatial Soliton in Photorefractive Medium

Dong Liangwei^{1,2} Ma Lihong^{1,2} Wang Hui²

(¹ College of Mathematics, Physics and Information Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004)
(² Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004)

Abstract: Internal charge drift is induced by applying an external electric field on the photorefractive crystal. The drifted charges may lead to the diffusion of spatial charges which accounts for the nonlocal nonlinearity. The propagation of spatial soliton supported in the photorefractive medium with drift and diffusion nonlinearity is investigated theoretically. The effective “acceleration” of soliton is derived by analyzing the dynamics of the (1+1) dimensional spatial soliton in this kind medium with equivalent-particle approximation methods. The parameters of input soliton and nonlocality determine the effective acceleration of soliton. The results can be used to calculate the propagation trajectory of solitons in a certain parameter range. We also simulate the propagation of soliton under perturbation of nonlocal nonlinearity. The theoretical analysis results are in good agreements with the numerical simulation results.

Key words: nonlinear optics; light-matter interaction; equivalent-particle approach methods; spatial soliton

1 引 言

空间光学孤子, 即空间自捕获光束, 由于具有独特属性和潜在的应用价值, 成为近年来备受关注的研究热点之一^[1~6]。许多应用, 比如光学图像重构^[7]、光开关^[8]、光学逻辑器^[9]等已见报道。为进一步探索空间孤子更多可能的应用, 扩展和理解孤子的动力学行为是很有必要的。

在适当条件下, 介质的非线性可表现出较强的非局域性, 即介质中某点处的非线性与整个光场或者该点周围某个区域内的光场强度有关^[10]。例如

在光折变晶体中, 当光束宽度很窄时, 非局域非线性将非常明显^[11,12]。非局域化非线性对孤子的动力学行为有着重要的影响。光折变晶体中的空间孤子, 由于其实验上易实现的特性, 得到了深入而广泛的研究^[13~16]。文献^[17]对光折变晶体中孤子传输行为做了数值分析, 发现孤子在介质非局域作用下会发生传播轨迹为抛物线的偏转现象。

空间孤子最重要属性之一是其动力学行为类似于粒子在光诱导产生势阱中的运动^[10,18,19]。这使得人们可以在一定程度上把孤子传输问题当作粒子运

* 国家自然科学基金(10575087)和浙江省自然科学基金(Y105061)资助的课题。

作者简介: 董亮伟(1975—), 男, 山西忻州人, 博士, 副教授, 主要从事非线性光学方面的研究。E-mail: donglw@zjnu.cn
收稿日期: 2006-10-08; 收到修改稿日期: 2007-01-23

动来处理。Aceves 等^[19]提出了等效粒子近似方法,用以讨论由界面分隔的自聚焦克尔非线性介质中孤子的传播行为。Scheuer 等^[20]发展了这一理论并用来研究在两种非线性介质分界面处两孤子的碰撞现象。最近, Y. V. Kartashov^[21,22]应用等效粒子近似理论,对横向周期性调制的非线性介质中系列孤子理论问题进行了分析和研究,发现了很多有益的属性。另外,梯度折射率非局域介质中孤子的传播行为也可由这种方法准确描述^[10]。

然而,关于光折变晶体中孤子传输行为的理论分析却少见报道。本文采用等效粒子近似方法,研究非相干背景光照射下的光折变晶体中(1+1)维低功率空间孤子动力学行为。求解得出孤子传播的有效“加速度”解析表达式,并对孤子的传播行为做了相应的数值模拟,所得结果验证了理论分析结果的正确性。

2 模型和理论分析

2.1 模型

光束在光折变晶体中的传播动力学行为由麦克斯韦方程和 Kukhtarev-Vinetskii 材料方程描述^[23,24]。对于大暗电导率的光折变材料,如铌酸锶钡(SBN)晶体,在傍轴近似条件下,上述方程组可简化为复振幅为 $A(x, z)$ 的归一化短波长修正的非线性薛定谔方程^[25]:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} - |A|^2 A - \mu \frac{\partial \ln(1 + |A|^2)}{\partial x} A, \quad (1)$$

式中 $x = X/x_0, z = Z/L_d, x$ 和 z 分别为归一化横向坐标和传播距离, μ 为表征光折变介质非局域程度的参量, $L_d = k_0 x_0^2$ 为衍射长度, k_0 为波数; $A(x, z) = E(x, z)(R_{dr}/I_d)$, $E(x, z)$ 为光场振幅, $R_{dr} = L_d/L_r$, $L_r = 2/(k_0 r_{\text{eff}} n^2 E_0)$ 为非线性折射长度, r_{eff} 为有效电光系数, n 为光折变晶体线性折射率, E_0 为横向方向上施加的外加电场, I_d 描述光折变晶体的暗电导率。

当光场振幅 $A(x, z)$ 较小时, (1) 式可近似表述为如下形式:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} - |A|^2 A - \mu \frac{\partial |A|^2}{\partial x} A. \quad (2)$$

考虑到介质的非局域性要远小于克尔效应, 可把非局域响应作为非线性薛定谔方程的扰动项处理:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + |A|^2 A = -\mu \frac{\partial |A|^2}{\partial x} A = -VA, \quad (3)$$

其中 $V = \mu \partial |A|^2 / \partial x$ 为由介质非局域性导致的光学势。由于实验中非局域化非线性响应总是小于局域响应, 参量可假设为较小值。

上述模型从物理上可解释为, 当光场入射到外加直流电压的光折变晶体时, 晶体中空间电荷会重新分布, 从而可能导致光束自陷——空间光学孤子——的产生。这个过程包括两个方面, 一方面, 外加电场引起的空间电荷移动, 即晶体折射率变化表现为介质非线性的局域化响应; 另一方面, 空间电荷的扩散又会导致介质非线性的非局域响应。而且入射光束很窄时, 非局域响应将会非常明显和重要。对于具有流动和扩散非线性的光折变晶体, 施加非相干背景光照明可使其中局域化响应呈克尔非线性, 而非局域响应表现为正比于横向光强梯度的附加折射率分布^[21,22]。因此, 孤子在光折变晶体中的传播行为由局域(克尔)和非局域响应(正比于强度的梯度)共同决定。从数学形式上看, 这种非局域响应对应于光纤孤子中的拉曼自频移效应^[25]。

2.2 等效粒子近似分析

应用等效粒子近似方法可定性得出非线性介质中孤子的动力学行为^[10,19]。在这种近似下, 光束可看成其位置由 $\bar{x}(z)$ 决定的“粒子”, 其中传播距离 z 等效于时间变量。定义光束“中心位置”:

$$\bar{x}(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} x A A^* dx / p(z),$$

其中 $p(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} A A^* dx$ 为光场功率。“有效速度”

$$v(z) = \frac{d\bar{x}}{dz} = \frac{1}{2i} \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (A \partial_x A^* - A^* \partial_x A) dx}{p(z)}, \quad (4)$$

“加速度”

$$a = \frac{d^2 \bar{x}}{dz^2} = \frac{dv}{dz} = -\frac{1}{p(z)} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dV}{dx} A A^* dx, \quad (5)$$

根据等效粒子近似理论, 可假设光场强度 $|A|^2$ 仅为 $x - \bar{x}(z)$ 的函数。

当非局域响应较弱时, 采用准均匀近似, (3) 式的扰动解为,

$$A(x, z) = \eta \text{sech}\{\eta[x - \bar{x}(z)]\} \exp\{i[v(z)x + \sigma(z)]\}, \quad (6)$$

其中 $d\sigma(z)/dz = (\eta^2 - v^2)/2$ 。

把势 V 表达式和(6)式代入(5)式, 可得加速度表达式

$$a(\bar{x}) = \frac{16\mu\eta^5}{15p}. \tag{7}$$

根据功率定义以及扰动解(6)式,可知功率 $p = 2\eta$, 所以,(7)式又可简化为

$$a(\bar{x}) = \frac{8\mu\eta^4}{15}, \tag{8}$$

显然,孤子传播的有效“加速度”仅依赖于非局域参量 μ 和孤子参量 η , 而与光束中心位置无关。图 1 列出了在低功率情况下孤子有效加速度与相关参量之间的关系。对于给定的人射孤子和参量,在介质非局域效应的影响下,孤子将做“匀加速”运动,其运动轨迹为一抛物线。图 2 给出了克尔效应和克尔非线性与非局域性同时存在时的孤子强度剖面随传播距离的变化。对比图2(a)和图2(b)并考虑(8)式可

发现,非局域效应的作用使得孤子在横向方向(x)上受到一个恒定的“力”的作用,从而产生“抛体”运动。

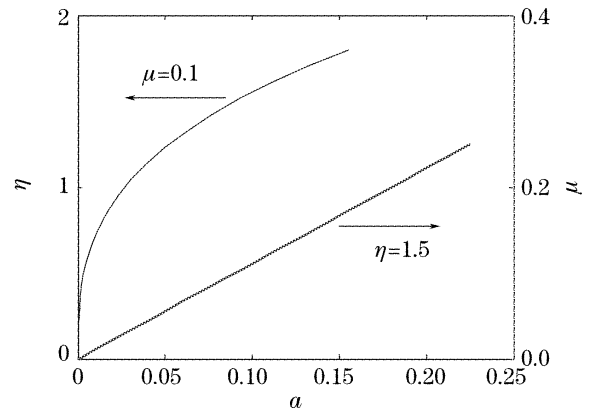


图 1 孤子“加速度”与参量 η 和 μ 的关系
Fig. 1 Acceleration of soliton versus parameters η and μ

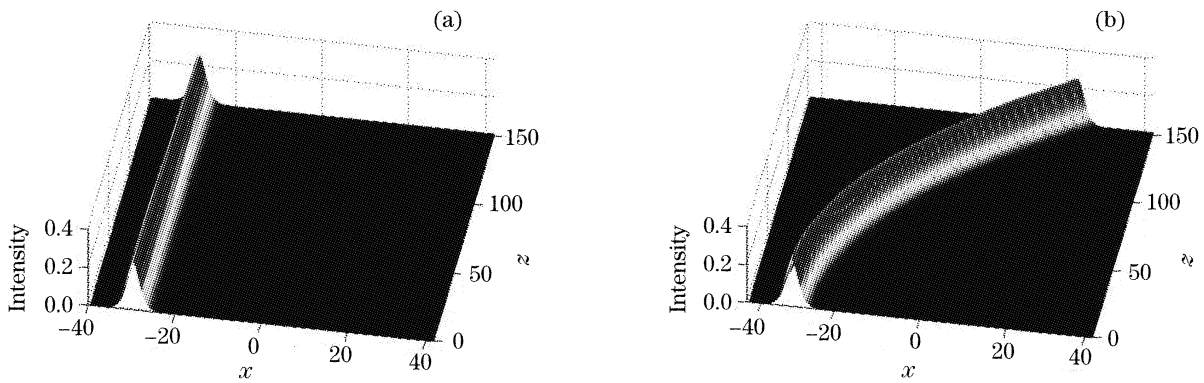


图 2 孤子传输行为示意, $\eta=0.5$. (a) $\mu=0$, (b) $\mu=0.15$
Fig. 2 Propagation of solitons with and without nonlocal nonlinearity. $\eta=0.5$. (a) $\mu=0$, (b) $\mu=0.15$

3 数值模拟

为验证上述理论分析结果,我们应用分步傅里叶迭代算法对孤子动力学行为做了数值仿真模拟。初始输入光束由(6)式决定,为简单起见,初始入射“有效速度”选为 0,即孤子沿 z 方向入射,初始位置

选为 $x=-30$ 。图 3 给出了数值模拟得出的光束中心位置和由(8)式给出的加速度所决定的孤子位置 x 随传播距离的变化情况。可明显看出,在孤子功率较低时,理论分析结论与数值模拟传输结果之间得到很好的符合。与文献[26]报道的铌酸锶钽

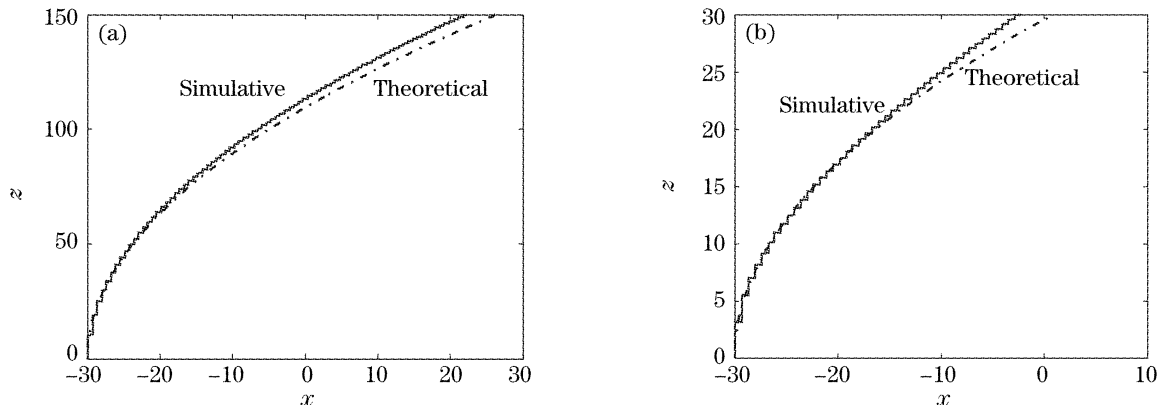


图 3 理论计算和数值模拟所得孤子中心位置随传播距离的变化。(a) $\eta=0.5, \mu=0.15$, (b) $\eta=1.7, \mu=0.05$
Fig. 3 Variations of the central position of the soliton versus propagation distance, by theoretical prediction and simulation.
(a) $\eta=0.5, \mu=0.15$, (b) $\eta=1.7, \mu=0.05$

(SBN)晶体中孤子在低功率情况下自弯曲效应的规律也符合较好(也即文献[26]中图6所示的低饱和情况下)。而数值模拟结果表明,当孤子功率较高时,孤子的传输行为由(1)式较为准确地描述,而且孤子振幅由于受到相对较大的扰动而轻微振荡,解析表达式(8)将不再适用。这是由于(2)式所决定的模型只有在光场功率较低时才能近似准确地描述光折变晶体中孤子的动力学行为。

4 结论与讨论

4.1 结论

应用等效粒子近似方法分析了非相干背景光照下的光折变晶体中(1+1)维低功率空间孤子动力学行为,得出这类介质中孤子运动“加速度”显式解。发现介质的非局域性会使孤子产生一个类似“平抛运动”的弯曲现象。孤子的有效“加速度”决定于孤子参量和非局域参量。当孤子功率较大时,本文所得的孤子有效“加速度”解析表达式(8)不再适用。对孤子在非局域非线性作用下的传播动力学行为做了仿真模拟,数值模拟结果与理论分析结论符合较好。

4.2 讨论

本文数值模拟过程中选取入射孤子“初速度”为零,得出孤子“平抛运动”的结论。若假设入射“初速度”不等于零,即入射光束 x 与方向有一夹角($dx/dz \neq 0$),则根据等效粒子理论分析结果,由于孤子受到一个恒定的“力”的作用,类比抛物运动规律,孤子将做“斜抛运动”,其运动轨迹仍为一抛物线,我们的数值分析也证明了这一点。另外,假设一孤子束缚态作为入射光束,由于其中所包含的孤子分量振幅各不相同,束缚态各分量将可能以不同加速度运动而相互分离。此外,在数值模拟过程中还发现,在非局域非线性作用下,孤子的振幅和形状不再如图2(a)所述恒定不变,而是随着传播距离的增加产生一个周期性振荡行为。这是由于不可积模型(2)式受到非局域扰动而被激发出孤子本身所固有的内模振荡导致^[27],内模的相关特性如振荡频率、内模对孤子传输的具体影响尚需进一步加以研究。

参 考 文 献

- 1 G. I. Stegeman, M. Segev. Optical spatial solitons and their interactions; universality and diversity [J]. *Science*, 1999, **286**(5444): 1518~1523
- 2 J. W. Fleischer, M. Segev, N. K. Efremidis *et al.*. Observation of two-dimensional discrete solitons in optically induced nonlinear photonic lattices[J]. *Nature* (London), 2003, **422**(6928): 147~150

- 3 Yu S. Kivshar, G. P. Agrawal. *Optical Solitons: from Fibers to Photonic Crystals* [M]. Academic, San Diego, Calif., 2003
- 4 Y. Silberberg, G. I. Stegman. *Spatial Solitons* [M]. New York: Springer, 2001
- 5 A. S. Desyatnikov, L. Torner, Yu S. Kivshar. Optical vortices and vortex solitons[J]. *Progress in Optics*, 2005, **47**: 1~60
- 6 Fangwei Ye, Liangwei Dong, Jiandong Wang *et al.*. Discrete elliptic solitons in two-dimensional waveguide arrays[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(4): 227~229
- 7 A. Bramati, W. Chinaglia, S. Minardi *et al.*. Reconstruction of blurred images by controlled formation of spatial solitons[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(18): 1409~1411
- 8 J. Scheuer, M. Orenstein. Interactions and switching of spatial soliton pairs in the vicinity of a nonlinear interface[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(23): 1735~1737
- 9 Y. H. Pramono, M. Geshiro, T. Kitamura *et al.*. Optical logic OR-AND-NOT and NOR gates in waveguides consisting of nonlinear material[J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2000, **E83-C**: 1755~1762
- 10 L. W. Dong, H. Wang. Oscillatory behavior of spatial soliton in a gradient refractive index waveguide with nonlocal nonlinearity [J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **84**(3): 465~469
- 11 V. M. Petnikova, V. V. Shuvalov, V. A. Vysloukh. Multicomponent photorefractive cnoidal waves; Stability, localization, and soliton asymptotics[J]. *Phys. Rev. E*, 1999, **60**(1): 1009~1018
- 12 M. I. Carvalho, S. R. Singh, D. N. Christodoulides. Self-deflection of steady-state bright spatial solitons in biased photorefractive crystals[J]. *Opt. Commun.*, 1995, **120**(5~6): 311~315
- 13 Ma Yanghua, Zhang Peng, Zhao Jianlin *et al.*. Numerical investigations of interactions among planar bright photorefractive screening solitons[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(2): 252~256 (in Chinese)
马仰华,张鹏,赵建林等.(1+1)维光折变亮屏蔽孤子相互作用的数值分析[J]. *光子学报*, 2006, **35**(2): 252~256
- 14 Wang Xiaosheng, She Weilong. Polychromatic spatial solitons in photorefractive polymers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 507~511 (in Chinese)
王晓生,余卫龙.光折变有机聚合物中的双色光空间孤子[J]. *光学学报*, 2004, **24**(4): 507~511
- 15 Guo Ru, Li Yigang, Ling Zhenfang *et al.*. Effect of diffusion on propagation of photorefractive spatial solitons [J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(8): 714~716 (in Chinese)
郭儒,李乙钢,凌振芳等.扩散对光折变空间孤子的影响[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8): 714~716
- 16 Zhu Nan, Guo Ru, Liu Simin *et al.*. Photovoltaic gray spatial solitons in photorefractive crystal[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(7): 903~907 (in Chinese)
朱楠,郭儒,刘思敏等.光折变晶体中的光生伏打灰空间孤子[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7): 903~907
- 17 W. Krolikowski, N. Akhmediev, B. Luther-Davies *et al.*. Self-bending photorefractive solitons[J]. *Phys. Rev. E*, 1996, **54**(5): 5761~5765
- 18 F. Garzia, C. Sibilia, M. Bertolotti. Swing effect of spatial soliton[J]. *Opt. Commun.*, 1997, **139**(4~6): 193~198
- 19 A. B. Aceves, J. V. Moloney, A. C. Newell. Theory of light-beam propagation at nonlinear interfaces. I. Equivalent-particle theory for a single interface[J]. *Phys. Rev. A*, 1989, **39**(4): 1809~1827
- 20 A. Suryanto, E. van Groesen. On the swing effect of spatial inhomogeneous solitons [J]. *J. Nonlinear Opt. Phys. and Materials*, 2001, **10**(2): 143~152
- 21 Y. V. Kartashov, V. A. Vysloukh, L. Torner. Tunable soliton self-bending in optical lattices with nonlocal nonlinearity [J].

- Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(15): 153903-1~153903-4
- 22 Y. V. Kartashov, L. C. Crasovan, A. S. Zelenina *et al.*. Soliton eigenvalue control in optical lattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(14): 143902-1~143902-4
- 23 J. Satsuma, N. Yajima. Initial value problems of one-dimensional self-modulation of nonlinear waves in dispersive media[J]. *Suppl. Prog. Theor. Phys.*, 1974, **55**: 284~295
- 24 N. Kukhtarev, V. Markov, S. Odulov *et al.*. Holographic storage in electrooptic crystals I. Steady state[J]. *Ferroelectrics*, 1979, **22**: 949~960
- 25 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. Academic Press, San Diego, California, 2001. 441~450
- 26 J. Petter, C. Weillnau, C. Denz *et al.*. Self-bending of photorefractive solitons[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **170**(4~6): 291~297
- 27 Liangwei Dong, Fangwei Ye, Jiandong Wang *et al.*. Internal modes of localized vortex soliton in a cubic-quintic nonlinear medium[J]. *Physica D*, 2004, **194**(3~4): 219~226

中国科学院上海光学精密机械研究所光学设计高级讲习班教材征订

中国科学院上海光学精密机械研究所光学设计高级讲习班于 2006 年 10 月 27 日胜利闭幕。现有少量讲习班辅导教材征订,数量有限,欲购从速。四本教材主要内容包括:

1) 王之江院士、徐文东研究员主讲光学系统设计

光学设计中的基本概念和问题: 光学系统的基本要求及指标、高斯光学、像差理论、成像质量和发展各种不同结构的光学系统的意义等的阐述,结合现在流行的光学软件设计的基本功能进行介绍,立足于当前具有代表性的产品设计进行实例的分析和讲解。

2) 朱健强研究员主讲光机系统设计和光学加工

本课程的内容涵盖了光机设计的原理、设计方法及常规内容。介绍各类光学元件加工的各个工艺环节及其相关测控技术,培养光学工程师所需掌握的必要光学加工工艺知识。平面、球面、透镜、棱镜等光学加工技术、非球面加工技术,特种光学元件加工技术,光学检测技术。

3) 范正修研究员主讲光学薄膜

从光学薄膜的一般性质出发,讲述光学薄膜在激光系统,光通信系统,显示系统中的应用,介绍极紫外和软 X 射线薄膜,功能性光学薄膜。分析激光对光学薄膜的破坏过程。

教材目录:

《光学加工与检测技术》、《光学机械设计》、《光学设计》、《光学薄膜及其应用》。

征订形式:

- 1) 全套教材或电子版: 400 元
- 2) 全套教材+电子版: 500 元
- 3) 单本教材+电子版: 150 元

优惠办法:

中国光学期刊网会员购买全套教材赠送价值 100 元的期刊阅读卡一张。

征订办法:

联系人: 高老师 电话: 021-69918253 邮箱: gfhai@siom.ac.cn

邮购方法:

请直接汇款到以下地址:

邮编: 201800 地址: 上海市嘉定区清河路 390 号 收款人: 光学期刊联合编辑部