

新型电光扫描器中光波导阵列特性研究*

梁华伟 石顺祥 李家立

(西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

摘要 利用有限差分光束传输法(FD-BPM)详细研究了光波导阵列电光扫描器的核心部件—光波导阵列的传输特性和辐射特性,分析了光波导阵列结构参量对其传输特性和辐射特性的影响. 研究表明,光波导芯层厚度、光波导阵列的周期、长度和层数对光波导阵列输出面上的光场振幅、相位分布及光波导阵列输出光束主瓣的半峰值全宽度(FWHM)影响很大. 通过与其它理论研究的结果进行比较指出,FD-BPM 可以很方便地、更全面地描述光波导阵列的传输和辐射特性. 另外,在研究光波导阵列光束扫描的基础上,根据光波导阵列电光扫描器的扫描探测要求,提出了光波导阵列结构优化设计的原则.

关键词 光学相控阵;光波导阵列电光扫描器;有限差分光束传输法(FD-BPM); FWHM

中图分类号 TN252 **文献标识码** A

0 引言

光学相控阵激光扫描技术的研究始于 20 世纪 70 年代^[1],这种技术可以看作是微波相控阵的光学模拟,是一种高分辨率、高精度、可智能化寻址的光束扫描技术. 近年来,国外光学相控阵的发展方向主要有两个,一个是研究以液晶作为电光材料的纵向相位调制器构成的光学相控阵^[2,3],另一个是研究以电光陶瓷作为电光材料的横向相位调制器构成的光学相控阵^[1,4]. 国内对光学相控阵的研究主要集中在一般理论^[5,6]和驱动电源方面^[7].

光波导阵列电光扫描器^[8,9]是一种以 AlGaAs 作为电光材料、通过外延生长制成的新型光波导阵列光学相控阵,在高速、大视场、低驱动电压等方面有明显的特点. 本文利用 FD-BPM 对光波在光波导阵列中的传输特性及其辐射特性进行了系统的理论研究,特别是研究了光波在光波导阵列中传输特性对光束偏转特性的影响,并且根据激光束扫描的要求,对光波导电光相控阵扫描器的结构优化问题进行了探讨,得到了一些具有实际意义的结论.

1 光波导阵列传输、辐射特性的理论研究概述

图 1 是光波导阵列电光扫描器的核心部件,它是由一系列光波导构成,其中包层兼起电极作用,称为电极层. 利用晶体的电光效应,通过电压控制系统在不同电极层上设置不同的电位,可以控制各个光波导芯层内的电场,从而可以使不同芯层有不同

的附加折射率差,不同的附加折射率差又可引起出射截面上光场不同的附加相位差,而按一定规律分布的相位差可以引起输出光束的偏转,这就是光波导阵列电光扫描器的基本工作原理. 本文利用 FD-BPM 研究在实际应用尺寸范围内光波导阵列的传输特性和辐射特性.

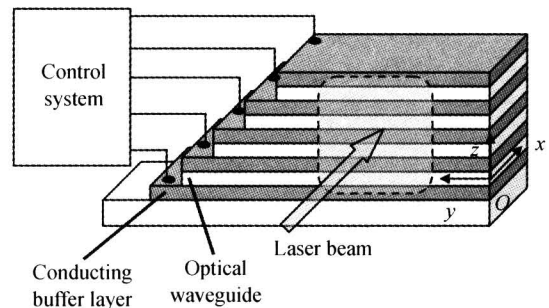


图 1 光波导阵列

Fig. 1 Configuration of an optical waveguide array

单色平面光波在这种光波导阵列中传播时,其电场的复振幅 $\tilde{E}(x, y, z)$ 满足亥姆霍兹方程

$$\nabla^2 \tilde{E} + k^2(x, y, z)\tilde{E} = 0 \quad (1)$$

式中,波数 $k(x, y, z) = k_0 n(x, y, z)$ 是空间变量, $n(x, y, z)$ 代表光波导阵列的折射率空间分布, $k_0 = 2\pi/\lambda$.

若将复振幅表示为

$$\tilde{E}(x, y, z) = E(x, y, z) \exp(i \tilde{k}x) \quad (2)$$

式中, \tilde{k} 为参考波数,代表场 \tilde{E} 的平均相位变化,则方程(1)经慢变化振幅近似后,其振幅 $E(x, y, z)$ 满足如方程(3)

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{i}{2k} \left[\frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + (k^2 - \tilde{k}^2)E \right] \quad (3)$$

对方程利用 FD-BPM 理论进行数值计算,可以求出光波导阵列中任意位置的光场分布.

* 国家自然科学基金(60277006)资助

Tel: 029-88202561 Email: xdlhuawei@163.com

收稿日期: 2005-07-07

利用有限差分法计算出光波导阵列输出面上的光场(振幅和相位)分布后,即可根据下面的衍射积分^[10]

$$\tilde{E}(P) = C \iint_{\Sigma} \tilde{E}(Q) \frac{e^{ikr}}{r} K(\theta) d\sigma \quad (4)$$

求出光波导阵列辐射光场的空间分布. 其中, $\tilde{E}(P)$ 为所求空间点的复振幅, $\tilde{E}(Q)$ 为光波导阵列输出面 Σ 上任意一点的光场复振幅, r 为 Q 点到 P 点的距离, $K(\theta)$ 为倾斜因子, C 为常量.

利用 FD-BPM 求解亥姆霍兹方程时,有三个重要近似:第一,采用近轴近似;第二,采用了标量场近似;第三,忽略反射波的影响.

2 光波导阵列的传输特性

对于图 1 的光波导阵列,令 N 代表光波导层数, a 代表光波导芯层厚度, d 代表阵列周期, L 代表光波导阵列长度, Δn 代表相邻光波导芯层间的折射率差. 利用 FD-BPM 可以计算得到光波导阵列任意截面上的光场振幅和相位分布.

2.1 光波导阵列输出面上光场的相位分布

图 2 表示 $a=0.55 \mu\text{m}$, $d=2.2 \mu\text{m}$, $\Delta n=0$ 时,输出面上 z 轴方向光场相位的分布情况. 横坐标轴上的黑色短线代表光波导芯层,两侧的空白代表光

波导包层. 由图可见,在输出面上,不同芯层中的光场相位基本一致,不同包层中光场相位也基本一致,但芯层和包层中的光场相位有一定差别. 这与光波导模式理论^[11]中同一横截面上光场相位完全相同的结论有一定差别. 而不同芯层中光场相位的起伏和相位分布不完全对称的现象起因于光波导之间的耦合,关于光波导阵列的耦合问题将另文专门讨论.

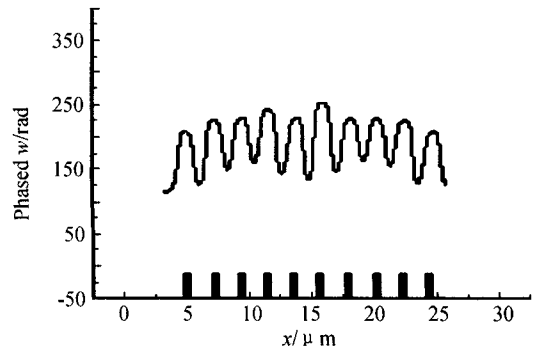


图 2 输出截面上 z 轴方向上光场的相位分布
Fig. 2 Phase of beam versus z on output section

2.2 光波导阵列输出截面上光场的振幅分布

图 3 示出了相应于不同波导芯层厚度 a , $d=2.2 \mu\text{m}$, $\Delta n=0$ 时,输出面上 z 轴方向的光场振幅分布. 由图可见,当 a 较小或较大时,各光波导包层内的光场振幅较大、各光波导芯层内光场振幅均存在起伏和不完全对称的现象;当 $a=0.57 \mu\text{m}$ 时,包

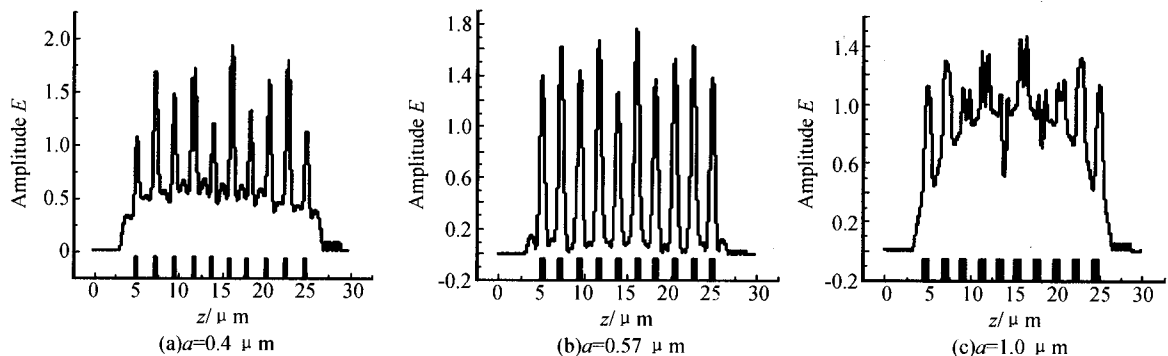


图 3 a 变化时,输出截面 z 轴方向上光场振幅分布变化的情况

Fig. 3 Amplitude of beam on output section versus z at different a

层中光场振幅最小,各光波导芯层内光场振幅基本相同. 实际上,相应于 $a=0.57 \mu\text{m}$ 的情况,恰对应光波导模式理论^[11]中单模工作的尺寸,而各光波导芯层内光场振幅存在起伏和不完全对称的现象起因于波导之间的耦合.

2.3 L 对传输特性的影响

图 4 表示输出面 z 轴方向上光场振幅分布随着光波导阵列长度 L 的变化情况. 由图可见,当 L 很

小时,包层中光场振幅很大;随着 L 的增大,包层中光场振幅减小,并趋于零;当 L 继续增大时,包层中光场振幅仍趋于零,但不同芯层中光场振幅分布差别较大,总的分布趋势是中央波导芯层内的光场振幅大,两侧的光场振幅较小. 这种分布现象,是由每个光波导结构决定的光波导效应和由光波导阵列结构决定的光波导间耦合效应共同的动态积累的结果.

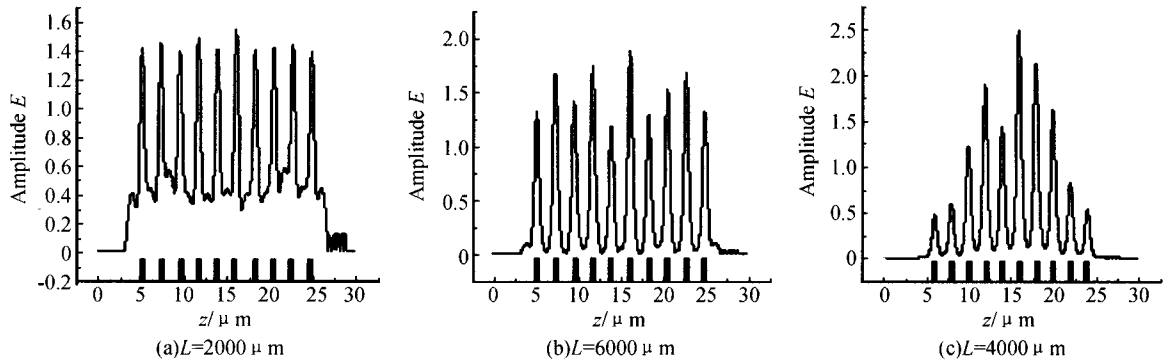


图 4 L 不同时, 输出截面 z 轴方向上光场振幅分布变化的情况
Fig. 4 Amplitude of beam versus z on output section at different L

3 光波导阵列的辐射特性

利用 FD-BPM 计算得到光波导阵列输出面上的电场振幅和相位分布后, 进而利用衍射积分可计算得到光波导阵列的辐射场分布.

图 5 为 $N=10, a=0.57 \mu\text{m}, d=2 \mu\text{m}, \Delta n=0$ 时, 光波导阵列辐射光强度的空间分布. 对于光波导阵列辐射光强度空间分布最主要的特性是主瓣的 FWHM, 它定义为辐射光强的半峰值全宽度.

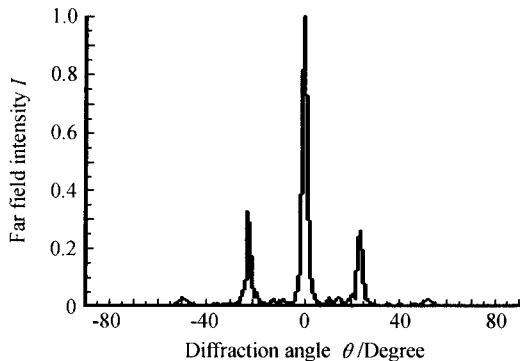


图 5 光波导阵列的光辐射分布
Fig. 5 Far-field intensity pattern for an optical waveguide array

3.1 N 对 FWHM 的影响

图 6 为 $a=0.55 \mu\text{m}, d=2.2 \mu\text{m}, N$ 从 4 到 10 变化时, FWHM 随 N 的变化关系. 由图可见, FWHM 随 N 的增大而减小. N 越大, 主瓣就越窄,

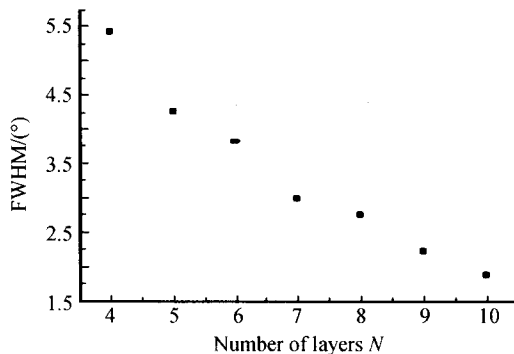


图 6 FWHM 随 N 的变化关系
Fig. 6 Relation of FWHM versus N

能量就越集中. 这与理想光栅衍射理论^[8]得出的结果一致.

3.2 a 对 FWHM 的影响

图 7 表示 $d=2.2 \mu\text{m}, a$ 从 $0.25 \mu\text{m}$ 到 $2 \mu\text{m}$ 变化时, FWHM 随 a 的变化关系. 由图可见, 当 a 在 $0.4 \mu\text{m}$ 到 $1.3 \mu\text{m}$ 间变化时, FWHM 基本不变; 当 a 在小于 $0.4 \mu\text{m}$ 的附近变化时, FWHM 发生了较大的变化; 当 $a > 1.3 \mu\text{m}$ 时, FWHM 发生很不规律的变化. 这说明, a 在 $0.4 \mu\text{m}$ 到 $1.3 \mu\text{m}$ 间的很大范围内变化时, 对辐射光强分布, 即对 FWHM 的影响很小, 这与由理想光栅衍射理论^[8]得出的结论一致. 但 a 小于 $0.4 \mu\text{m}$ 变化时, 由于光波导芯层很薄, 包层很厚, 分布在包层中的光场较强, 且由图 2 知, 光波导芯层和包层中的光场相位不一致, 从而与理想光栅衍射理论的讨论差别较大, 其辐射光强分布产生较大的变化. 当 $a > 1.3 \mu\text{m}$ 时, 由于光波导包层较薄, 光波导间的耦合严重, 其辐射光强的分布与理想光栅衍射理论的讨论不符. 与理想光栅衍射理论存在差别的基本原因是, 后者未考虑光波导之间的耦合, 因此, a 的变化对 FWHM 无影响.

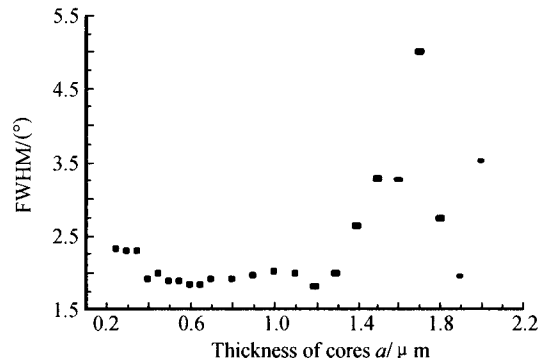


图 7 FWHM 随 a 的变化关系
Fig. 7 Relation of FWHM versus a

3.3 d 对 FWHM 的影响

取 $a=0.55 \mu\text{m}, d$ 从 $1.6 \mu\text{m}$ 到 $2.2 \mu\text{m}$ 变化, FWHM 随 d 的变化关系如图 8. 由图可见, 当 $d \geq 1.7 \mu\text{m}$ 时, FWHM 随着 d 的增大而减小, 这与理

想光栅衍射理论^[8]的结论(FWHM 随着 d 的增大单调减小)一致;而当 d 由 $1.6 \mu\text{m}$ 向 $1.7 \mu\text{m}$ 增大时,FWHM 也增大,与理想光栅衍射理论不同,其差别也是由于波导之间存在耦合所致.

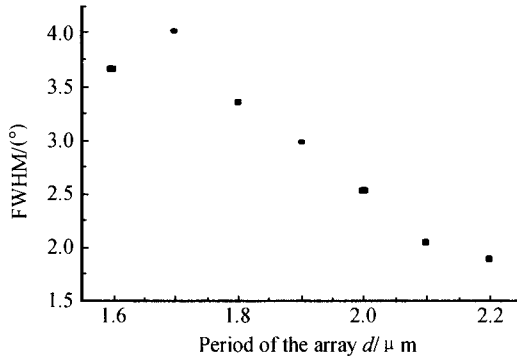


图 8 FWHM 随 d 的变化关系

Fig. 8 Relation of FWHM versus d

3.4 Δn 对辐射特性的影响

为了研究光波导阵列的扫描特性,计算了光波导阵列中相邻波导芯层折射率差 Δn 变化时,空间辐射光强分布变化规律.图 9 为 $N=10$ 、 $a=0.57 \mu\text{m}$ 、 $d=2 \mu\text{m}$ 时,对应于 $\Delta n=4 \times 10^{-5}$ 、 8×10^{-5} 时的辐射光强分布情况.由图 5 和图 9 可见,相应于不同的 Δn ,空间辐射光强分布的主瓣偏转角度依次为 0° 、 6° 、 12° .因此,利用不同的效应(例如晶体中的电光效应)改变 Δn ,可以使辐射光的主瓣按要求发生偏转,从而实现激光束的空间扫描,这就是新型光波导阵列电光扫描器的工作原理^[8].

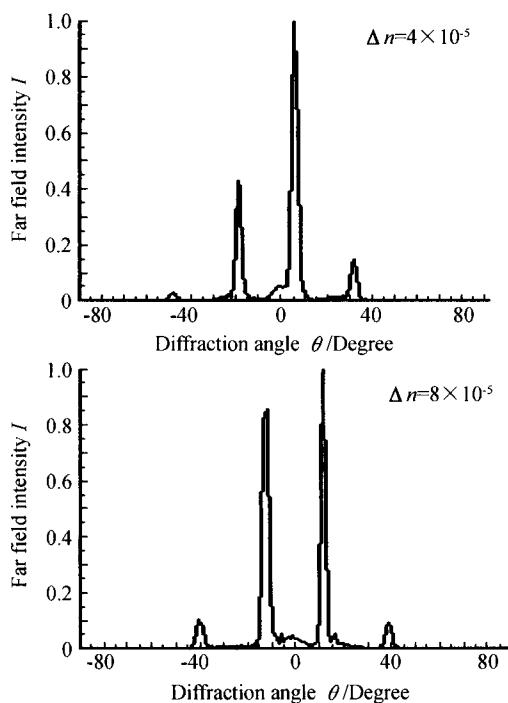


图 9 Δn 改变时,辐射光强分布变化的情况

Fig. 9 Far-field intensity patterns at different Δn

4 光波导阵列结构参量的优化设计

根据上面对光波导阵列传输特性和空间辐射特性的讨论,在对光波导阵列电光扫描器的结构优化设计中,应考虑如下原则:

1) 光波导阵列长度 L 对输出截面上光场振幅分布影响较大.在实际应用中,为了获得好的扫描效果,应合理选取 L ,保证包层中光场振幅趋于零,且不同芯层中光场分布尽可能相同;2) 由于辐射光束的 FWHM 随着光波导阵列层数 N 的增大而减小,而 FWHM 减小就意味着辐射光的主瓣变窄.在扫描范围和辐射光总强度不变的情况下,光束越窄,能量越集中,扫描分辨率越高.故在工艺允许的情况下,应尽可能增大 N ;3) 在光波导芯层厚度 a 取值的很大范围内,对辐射光束的 FWHM 影响很小,但对光波导阵列包层中光场振幅的分布影响较大.因光波导阵列输出面上包层中光场振幅越小,越有利于提高扫描光束的质量.故光波导芯层厚度 a 的设计,应按模式理论保证其单模工作为宜;4) 当光波导间的耦合较小时,FWHM 随着光波导阵列周期 d 的增大而减小.但进一步研究发现, d 对扫描范围有影响,随着 d 的增大,扫描范围会减小.故对于 d 的选取,应在耦合允许的范围内,综合上述两个因素,折衷考虑.

5 结论

利用有限差分光束传输法(FD-BPM)详细研究了光波导阵列的传输特性及辐射特性,通过与利用其它理论的研究结果比较指出,FD-BPM 可以很方便地、更全面地描述光波导阵列的耦合特性;分析了光波导阵列的结构参量对其传输特性和辐射特性的影响.另外,根据光波导阵列电光扫描器的扫描探测要求,提出了光波导阵列结构参量优化设计的原则.

参考文献

- 1 Thomas J A, Fainman Y. Optimal cascade operation of optical phased array beam deflectors. *Applied Optics*, 1998, **37**(26): 6196~6212
- 2 Mcmanamon P F, Watson E A, Dorshner T A, et al. Applications look at the use of liquid crystal writable gratings for steering passive radiation. *Optical Engineering*, 1993, **32**(11): 2657~2664
- 3 Resler D P, Hobbs D S, Sharp R C, et al. High-efficiency Liquid-crystal optical phased array beam steering. *Optics Letters*, 1996, **21**(9): 689~691

- 4 Thomas J A, Lasher M, Fainmun Y, *et al.* A PLZT-based dynamic diffractive optical element for high speed, random-access beam steering. *Proc of SPIE*, 1997, **3131**:124~132
- 5 李家立,石顺祥,王广生,等. 新型光波导阵列电光快速扫描器的光波导效应. 光子学报,2002,**31**(8):951~954
Li J L, Shi S X, Wang G S, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2002,**31**(8): 951~954
- 6 吕秀品,冯克成,刘伟奇. 光学相控阵扫描的理论研究. 长春理工大学学报,2002,**25**(12):47~49
Lü X P, Feng K C, Liu W Q. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2002,**25**(12):47~49
- 7 Gong Xiangdong, Li Jingzhen, Li Shanxiang, *et al.* Optical phased array beam deflector drive study. *Acta Photonica Sinica*, 2004,**33**(3): 307~309
- 8 石顺祥,李家立,王广生,等. 一种新型的光波导阵列电光快速扫描器. 光学学报,2002,**22**(11):1318~1322
Shi S X, Li J L, Wang G S, *et al.* *Acta Optica Sinica*, 2002,**22**(11): 1318~1322
- 9 李家立,马琳,钟璐,等. 十单元光波导阵列电光扫描器实验研究. 光子学报,2004,**33**(z1):26~27
Li J L, Ma L, Zhong L, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004,**33**(z1): 26~27
- 10 石顺祥,张海兴,刘劲松. 物理光学与应用光学. 西安:西安电子科技大学出版社,2000. 124~125,141~145
Shi S X, Zhang H X, Liu J S. *Physical Optics and Applied Optics*. Xi'an: Xidian University Press, 2000. 88~89,141~145
- 11 李玉权,崔敏编著. 光波导理论与技术. 北京:人民邮电出版社,2002. 62~74,102~108
Li Y Q, Cui M. *Optical Waveguide Theory and Technology*. Beijing: Demos Posts and Tele Communication Press, 2002. 62~74, 102~108

Study on Characteristics of an Optical Waveguide Array in a Novel Type of Electro-optic Scanners

Liang Huawei, Shi Shunxiang, Li Jiali

School of technical physics, Xidian University, Xi'an 710071

Received date: 2005-07-07

Abstract Optical Waveguide Array (OWA) was the key parts of Optical Waveguide Array Electro-Optic Scanner (OWAEOS). Propagation and output characteristics of OWA were studied in the finite-difference beam-propagation method (FD-BPM). Effect of structure parameters of OWA on propagation and output characteristics was analyzed. These results showed that core layer thickness, period, length and number of optical waveguide of OWA were of great effect on amplitude and phase distribution on output section and on the full width at half-maximum (FWHM) of main lobe of output beam. By comparing these results with what were obtained in other methods, the FD-BPM was more convenient and comprehensive to describe propagation and output characteristics of OWA. In addition, scanning characteristics of OWA were studied. Then according to the demand of beam scanning, the optimal structure scheme of OWA is presented.

Keywords Optical phased array; Optical waveguide array electro-optic scanner; Finite-difference beam-propagation method; FWHM



Liang Huawei was born in 1981, in Shandong Province. Now he has been working towards the Ph. D. degree at the school of technical physics of Xidian University. His research interests focus on the fields of photoelectron technology and optical waveguide array theory.