

非平整端面光波导光学相控阵输出特性的研究

孙艳玲, 聂光, 石顺祥, 马琳, 鲁振中

(西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 光波导光学相控阵器件端面的平整性对其输出特性有很大影响。基于光场相干叠加原理, 建立了非平整端面下光波导光学相控阵的远场光场分布模型, 给出了远场光场分布的一般公式, 分析了非平整端面如何影响输出面上光场的相位以及输出面相位的变化如何影响远场光场分布。利用该模型计算和分析了倾斜平面、凹面、单层凹陷以及随机起伏面这几种特殊非平整端面下光波导光学相控阵输出光强分布的特点。研究表明: 当光波导光学相控阵的端面非平整时, 会不同程度地改变远场主瓣的位置和强度, 影响光束扫描精度和功率。

关键词: 光波导光学相控阵; 相干叠加; 非平整端面; 远场光场分布模型

中图分类号: TN252 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2747-05

Output characteristics of uneven-surface waveguide optical phased array

Sun Yanling, Nie Guang, Shi Shunxiang, Ma Lin, Lu Zhenzhong

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The surface profile is of importance to the output characteristics of the waveguide optical phased array. The far field diffraction model of the array with an uneven surface was established based on the coherent superposition principle. The general formulas of the far optical field distribution were derived using the model. The effects of the surface profile on the output wave phase and the phase on the far optical field distribution were analyzed. When the surface profile was a inclined surface, a concave one, the single depression and the random fluctuation, the output light intensity was researched respectively. The results show that the surface profile has a great influence on the output far optical field and the position and intensity of the main lobe will be changed partly. These will affect the accuracy and power of the scanning beam and is of importance to the application of the waveguide optical phased array.

Key words: waveguide optical phased array; coherent superposition; uneven surface; far-field optical field distribution model

收稿日期: 2015-01-10; 修订日期: 2015-02-13

基金项目: 国家自然科学基金(11304240)

作者简介: 孙艳玲(1971-), 女, 副教授, 博士, 主要从事光学相控阵、光电导开关技术等方面的研究。Email: ylsun@mail.xidian.edu.cn

0 引言

在诸多光电子技术中,激光扫描是其中一项极其重要的技术^[1]。光学相控阵具有体积小、自由寻址、驱动电压低、全固态化、可靠性高、成本低等优点,已经成为了激光扫描技术的重要发展方向^[2-5]。

光波导光学相控阵的核心是光波导阵列,其由多个波导芯层和包层交替组成,每一芯层与其两侧的包层组成一个光波导。芯层具有电光效应,包层兼作电极层,外电路通过电极层提供电光效应所需的电场。不同的波导芯层外加不同电场来获得所需的电光相位延迟,从而控制输出光束的波前形状,当外电场变化时,光束空间指向改变形成光束扫描。与其他光学相控阵相比,基于 GaAs 光波导阵列的光学相控阵具有扫描范围大、响应时间快(10^{-12} s)的优点^[6]。

光波导相控阵的实质是对激光束波前进行相位调制。但在实际应用中,光束波前还会受其他因素的影响,例如制造工艺导致的器件结构与理论设计之间的差异和相位调制过程中的电压控制精度等问题。由制造工艺导致的器件结构与理论设计之间的差异表现在不同波导层的光电特性不一致、波导层厚度不均匀和端面非平整等。光电特性和波导层厚度的不均匀可以通过外电路控制进行相位补偿,已有相关文献对这方面进行了研究^[7],但端面的非平整问题至今还很少被考虑到,而端面的非平整不仅会影响光束在器件出射面的相位,还会影响光束在传播过程中的空间相位延迟。针对这一问题,采用光场的相干叠加理论建立了相应的理论模型,研究了非平整端面对光波的远场分布的影响,并针对几种特殊形状的端面情况进行了理论分析和模拟。

1 非平整端面的光场叠加模型

光波导光学相控阵的工作原理如图 1 所示。电

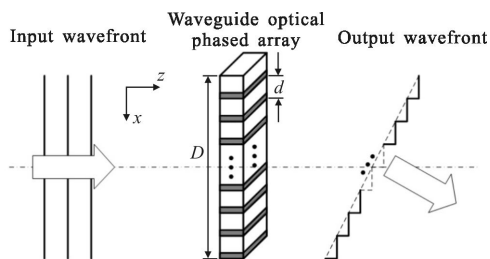


图 1 光束偏转的原理

Fig.1 Principle of beam deflection

控系统使得不同波导层偏置在不同电场强度下,由于电光效应导致波前为平面的入射光束通过不同波导层后产生不同的附加相位延迟,使得输出光束波前发生偏转。

为了研究光波导阵列端面的平整性对输出光场的影响,将每个光波导相移单元看作一个端面上的阵元,讨论阵元间距相等的情况。如图 2 所示,由 N 个阵元组成的输出面为一任意非平整面,引入端面函数 $d(x_i)$,其定义为以 x 轴为基准沿 z 轴方向偏离 x 轴的位置。理想情况下,在远场观察点 P 处,第 i 个阵元发出波长为 λ 的光电场强度 E_i 可表示为^[8]:

$$E_i(P) = A_i e^{-j\varphi_i} f_i(\theta) \frac{e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} r_i}}{r_i} \quad (1)$$

式中: A_i 为第 i 个阵元的光电场振幅; φ_i 为光束经过光波导后的相位; r_i 为第 i 个阵元到 P 点的距离; $f_i(\theta)$ 为倾斜因子; θ 为 r_i 与 z 轴的夹角。

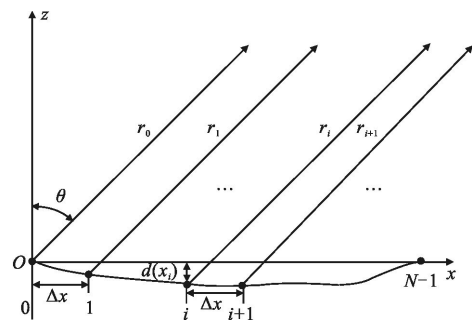


图 2 N 单元相控阵模型

Fig.2 Model of N -element phased array

P 点处总的光电场可以认为是所有 N 个阵元到 P 点光电场的叠加,即:

$$E(P) = \sum_{i=0}^{N-1} E_i(P) = \sum_{i=0}^{N-1} A_i e^{-j\varphi_i} f_i(\theta) \frac{e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} r_i}}{r_i} \quad (2)$$

由于 P 点位于远场, r_0 与 r_i 差别很小,因此可以将公式(2)右边分母中 r_i 用 r_0 代替,但相位因子中的 r_i 不能用 r_0 代替。文中以均匀平面波为入射光波,则 A_i 为常数 A 。假定 $f_i(\theta)$ 对于所有方向的取值都一样,在 $f(\theta)=1$ 的条件下,公式(2)可以表示成:

$$E(\theta) = \frac{1}{r_0} A \sum_{i=0}^{N-1} \exp \left[-j \left(\varphi_i + \frac{2\pi}{\lambda} r_i \right) \right] \quad (3)$$

式中:相位因子包括两项,其中第一项 φ_i 为光束通过第 i 个阵元经电光效应调制后的端面相位,第二项是第 i 个阵元到 P 点的空间相位延迟,与该阵元

的位置有关。

1.1 端面函数 $d(x_i)$ 与 r_i 的关系

对于非平整的端面,先研究两个相邻阵元的空间位置对 r_i 的影响,如图3所示为第 i 个阵元和第 $i+1$ 个阵元之间的空间位置关系。 r_i 与 r_{i+1} 指向远场 P 点,且互相平行, P 点对相控阵的偏角为 θ ,沿 x 轴方向两个阵元的间距为 Δx ,沿 z 轴方向的间距为 $d(x_i)-d(x_{i+1})$,那么由图中几何关系可得:

$$r_{i+1}=(r_i-\Delta x \sin \theta)+(d(x_i)-d(x_{i+1})) \cos \theta \quad (4)$$

公式(4)为关于 r_i 的数列递推公式,其初项为 r_0 ,经过计算可得 r_i 的通项公式为:

$$r_i=r_0-d(x_i) \cos \theta-i \Delta x \sin \theta \quad (5)$$

公式(5)描述了 r_i 与端面函数 $d(x_i)$ 的关系。

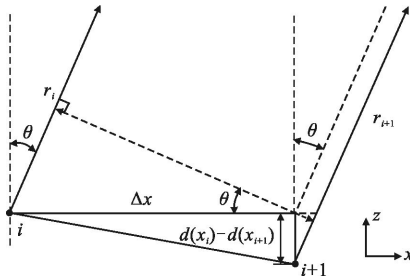


图3 相邻单元间的空间位置

Fig.3 Spatial position of adjacent elements

1.2 端面函数对输出特性的影响

光束通过波导层后的相位是基于电光效应来进行调制的,可归结为对折射率的调制。当端面为理想平面、光波导相控阵对出射光波前的调制偏角为 θ_s 时,第 i 个波导层经电光效应调制的折射率为 $n_i=n_0+i \Delta n$,此时 $\varphi_i=\varphi_0+i \Delta \varphi$, $\Delta \varphi=\frac{2 \pi}{\lambda} \Delta x \sin \theta_s^{[9]}$,若波导层长度为 l ,相邻波导层之间的相位差为 $\Delta \varphi=\frac{2 \pi}{\lambda} \Delta n l$,因此相邻波导层之间的光程差 $\Delta n l$ 和波导间距 Δx 之间存在关系 $\Delta n l=\Delta x \sin \theta_s$ 。取 $\varphi_0=0$,若端面非平整,则有:

$$\varphi_i=i \frac{2 \pi}{\lambda} \Delta x \sin \theta_s+\frac{2 \pi}{\lambda}\left(n_0+i \Delta n\right) d\left(x_i\right) \quad (6)$$

将 Δn 代入上式,得:

$$\varphi_i=i \frac{2 \pi}{\lambda} \Delta x \sin \theta_s+\frac{2 \pi}{\lambda}\left(n_0+i \frac{\Delta x}{l} \sin \theta_s\right) d\left(x_i\right) \quad (7)$$

将公式(5)和公式(7)代入公式(3)可得:

$$E(\theta)=\frac{A}{r_0} \sum_{i=0}^{N-1} \exp (-j) \frac{2 \pi}{\lambda}\left\{i \Delta x \sin \theta_s+\left(n_0+i \frac{\Delta x}{l} \sin \theta_s\right) d\left(x_i\right)+\left[r_0-d\left(x_i\right) \cos \theta-i \Delta x \sin \theta\right]\right\}$$

将相位中与 i 无关的常数项提出,整理可得:

$$E(\theta)=C \sum_{i=0}^{N-1} \exp j \frac{2 \pi}{\lambda}\left[i \Delta x\left(\sin \theta-\sin \theta_s\right)-d\left(x_i\right) \cdot\left(n_0+i \frac{\Delta x}{l} \sin \theta_s-\cos \theta\right)\right] \quad (8)$$

式中:常数 $C=\frac{A}{r_0} \exp (-j r_0)$,公式(8)中相位因子的第一项与平整端面情况完全一致,而第二项中包含端面函数 $d(x_i)$ 和波导折射率这些结构因子。

2 几种特殊端面条件下远场光场分布

利用前期工作的结果^[10],当不考虑波导间的耦合效应时,其周期性衍射光场的光强分布特性可以表示为 $I(\theta)=\left(\frac{\sin \alpha}{\alpha}\right)^2 E^2(\theta)$,其中 $\alpha=\frac{\pi}{\lambda} a \sin \theta$, a 为芯层厚度。文中仅对激光束偏转角度 $\theta_s=0$ 这种情况进行分析。

2.1 端面为平面

如果端面为平整端面, $d(x_i)=0$,公式(8)可以简化为:

$$E(\theta)=C \sum_{i=0}^{N-1} \exp j \frac{2 \pi}{\lambda}\left[i \Delta x\left(\sin \theta-\sin \theta_s\right)\right]$$

此即理想情况下光波导阵列相控阵的远场光场表达式,这表明非平整端面的光场叠加模型对于理想平整端面依然适用。

2.2 端面为斜面

实际器件的端面可能与 x 轴并不重合,而是与 x 轴有一定的夹角的斜面,此时取端面函数为 $d(x_i)=i d_1$,其倾斜程度用 d_1 描述。图4所示为在 $N=10$ 、 $\lambda=1 \mu \text{m}$ 、 $n=3.5$ 、 $\Delta x=2 \mu \text{m}$ 、 $a=0.5 \mu \text{m}$ 、 $l=5 \text{mm}$ 的条件下, d_1 取不同值时对远场光强分布的影响。

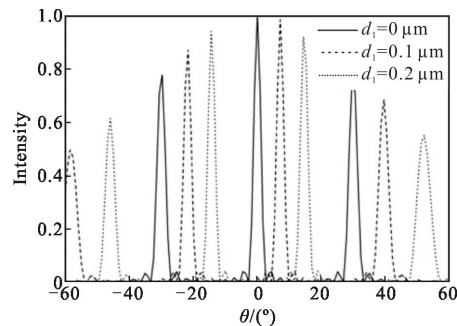


图4 端面倾斜程度不同对远场光强的影响

Fig.4 Effect of incline of surface on far-field intensity

由图4可以看出,当端面为斜面时,主瓣和栅瓣的位置整体产生偏移,偏移量随着端面倾斜因子 d_1

的增大而变大。这是因为随着倾斜因子 d_1 的增大, 每个波导层的相位延迟将呈线性增大, 造成光场分布的整体偏移。

2.3 端面为抛物面

当光波导阵列端面为凹面时, 假设端面为一抛物面, 取端面函数为 $d(x_i) = d_2[l^2 - (N-1)i]$, 这样保证了抛物面的对称性, 其凹陷程度用 d_2 来描述。图 5 所示为在 $N=10$ 、 $\lambda=1 \mu\text{m}$ 、 $n=3.5$ 、 $\Delta x=2 \mu\text{m}$ 、 $a=0.5 \mu\text{m}$ 、 $l=5 \text{mm}$ 条件下, d_2 取不同值时对远场光强分布的影响。

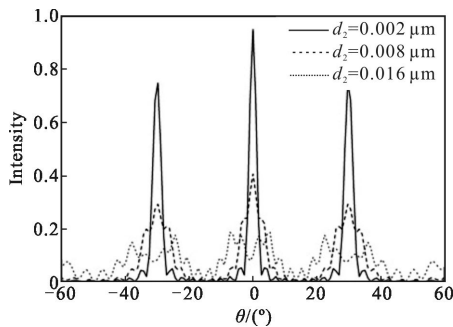


图 5 端面凹陷程度不同对远场光强的影响

Fig.5 Effect of concave of surface on far-field intensity

由图 5 可以看出: 随着凹陷程度 d_2 的增大, 主瓣和栅瓣的幅度都出现了大幅的下降。注意到端面中心与最外层的高度差大约为 $0.25d_2 \cdot N^2$, 当 $d_2=0.008 \mu\text{m}$ 时, 端面中心的凹陷深度约为 $0.2 \mu\text{m}$, 这与阵元周期 $\Delta x=2 \mu\text{m}$ 相比是很小的, 但此时主瓣的光强已经不到理想端面输出的一半; 而当 $d_2=0.016 \mu\text{m}$ 时, 主瓣光强已经不足理想情况的 20%, 能量变得很分散, 主瓣和栅瓣变得不再清晰可见, 很难再应用于激光扫描。

2.4 端面出现局部凹陷

当光波导阵列端面由于生长或者损伤等原因出现了局部凹陷, 简单起见, 假设凹陷位于第 $N-1$ 层, 其凹陷程度为 d_3 , 图 6 所示为在 $N=10$ 、 $\lambda=1 \mu\text{m}$ 、 $n=3.5$ 、 $\Delta x=2 \mu\text{m}$ 、 $a=0.5 \mu\text{m}$ 、 $l=5 \text{mm}$ 条件下, d_3 取不同值时对远场主瓣光强的影响。

由图 6 可以看出: 远场主瓣强度随单层凹陷的程度周期性变化, 图中结果表明此周期为 $0.4 \mu\text{m}$ 。从光传输的角度来分析, 单层凹陷与光波导阵列端面其他波导层存在着相位差, 该相位差为 2π 的整数倍或光程差为波长的整数倍时, 即满足 $(n-1)d_3 = m\lambda$ (m 为整数), 远场光强分布与端面平整情况相同。由上述 n 和 λ 的取值, 当 $m=1$ 时, $d_3=0.4 \mu\text{m}$ 。二者结果

一致, 这也间接证明了文中模型的正确性。

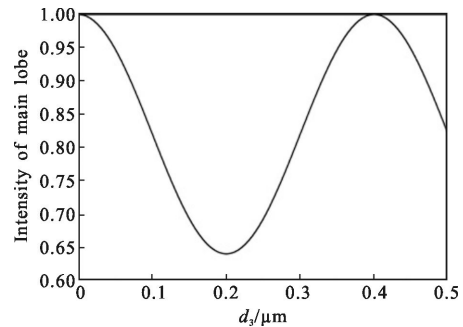


图 6 单层缺陷对远场主瓣光强的影响

Fig.6 Effect of single depression on far-field intensity of main lobe

2.5 端面为随机起伏面

假设光波导端面的起伏为一随机变量, 且符合正态分布, 因此端面函数可以假设为以理想平整端面为基准呈正态分布的随机函数, 起伏程度用正态分布的标准差 σ 来描述。图 7 所示为在 $N=10$ 、 $\lambda=1 \mu\text{m}$ 、 $n=3.5$ 、 $\Delta x=2 \mu\text{m}$ 、 $a=0.5 \mu\text{m}$ 、 $l=5 \text{mm}$ 条件下, 标准差 σ 取不同值时对远场主瓣光强的影响, 其中主瓣强度为取多次统计平均后的结果。

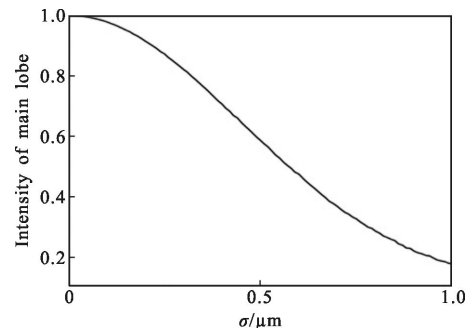


图 7 随机端面函数起伏程度不同对远场主瓣光强的影响

Fig.7 Effect of the fluctuation of surface on the far-field intensity of main lobe

由图 7 可以看出: 随着端面起伏程度的增大, 主瓣光强会逐渐降低, 由于端面分布的正态分布统计特性, 使得主瓣光强的统计平均也表现出正态分布特性, 当 $\sigma=0.5 \mu\text{m}$ 时, 主瓣光强已衰减到不足理想平整端面时主瓣光强的 60%, 这对于生产工艺的改进具有指导性意义。

3 结论

端面因子是光波导光学相控阵的重要结构因

子,它不但决定光波导阵列输出面的形状,还会对远场光强分布产生影响。文中从光场衍射叠加理论出发,建立了一般端面对下的远场光场叠加模型,并在调制偏角为零情况下对几种特殊形状端面的光场分布进行了模拟和分析。模拟结果表明:光波导阵列端面的平整性对光场分布产生很大的影响,这对于如何改进端面的平整性和如何利用端面形状修正波前等实际应用具有重要的意义。

参考文献:

- [1] Rowe D M. Developments in holographic- based scanner designs [C]//SPIE, 1997, 3131: 52-58.
- [2] Sun Jie, Timurdogan Erman, Yaacobi Ami, et al. Large-scale silicon photonic circuits for optical phased arrays [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(4): 8201115.
- [3] Zheng Yingjing, Hooi Sing Lee, Sascha Meyne, et al. Waveguide-based optical phased array [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(18): 1826-1828.
- [4] Gong Xiangdong, Li Jingzhen, Li Shanxiang, et al. Optical phased array beam deflector drive study [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(3): 307-309.
- [5] Qu Ronghui, Ye Qing, Dong Zuoren, et al. Progress of optical phased array technology based on electro-optic material [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35 (12): 1861-1867. (in Chinese)
- [6] 瞿荣辉, 叶青, 董作人, 等. 基于电光材料的光学相控阵技术研究进展[J]. *中国激光*, 2008, 35(12): 1861-1867.
- [6] Hobbs R H, Cantor A J, Grantham D H, et al. Laser electro-optic phased array devices (LOESPAR) [C]// Lasers and Electro-optics Society Annual Meeting, LEOS'88, 1988: 94-95.
- [7] Liang Huawei. Theory and experiment study on waveguide optical phased array technology [D]. Xi'an: Xidian University, 2007: 95-99. (in Chinese)
- [7] 梁华伟. 光波导光学相控阵技术的理论和实验研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007: 95-99.
- [8] Shi Shunxiang, Wang Xueen, Liu Jinsong. Physical Optics and Applied Optics [M]. 2nd ed. Xi'an: Xidian University Press, 2008: 142-143. (in Chinese)
- [8] 石顺祥, 王学恩, 刘劲松. 物理光学与应用光学[M]. 2版. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008: 142-143.
- [9] Li Jiali. Study on waveguide optical phased array technology [D]. Xi'an: Xidian University, 2005: 20-35. (in Chinese)
- [9] 李家立. 光波导光学相控阵技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005: 20-35.
- [10] Li Jiali, Shi Shunxiang, Liu Lifang, et al. Electromagnetism theory of waveguide array electro-optical scanner: model and characteristics of optical field distribution in the waveguide in the waveguide array [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(2): 023105.1-023105.6.