阵列波导光栅中自由传播区模式的有效折射率

刘志明[1,2],陈坤峰[1,2],高业胜[2],史学舜[1,2],简水生[3]

(1. 电子测试技术重点实验室,山东 青岛 266555;
2. 中国电子科技集团公司第四十一研究所,山东 青岛 266555;
3. 北京交通大学 光波技术研究所,北京 100044)

摘　要：针对阵列波导光栅设计中自由传播区模式有效折射率的确定问题，提出了一种采用加权等效模式折射率作为自由传播区模式有效折射率的方法。通过引入慢变包络近似条件并采用吸收边界条件的一阶 Galerkin 有限元法，给出了阵列波导光栅自由传播区仅含有磁场分量的全矢量波动方程组。在此基础上,基于三维全矢量束传播法对自由传播区光场进行了模式分析,并结合导模传输分析法,推导给出了加权等效模式折射率的表达式,为阵列波导光栅设计中自由传播区模式折射率的确定提供了一个理论依据。

关键词：有限元；　束传播法；　导模传输分析法；　阵列波导光栅

中图分类号：TN929.11　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1007-2276(2013)08-2146-04

Determination problem of mode effective refractive index in the free propagation region of AWG

Liu Zhiming[1,2], Chen Kunfeng[1,2], Gao Yesheng[2], Shi Xuesun[1,2], Jian Shuisheng[3]

(1. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, Qingdao 266555, China;
2. The 41st Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao 266555, China;
3. Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

Abstract: Considering the determination of mode effective refractive index in the free propagation region of AWG, a new method using weighted equivalent mode refractive index as the mode effective refractive index in the free propagation region was proposed. The vector wave equation of magnetic field in the free propagation region of AWG was demonstrated using Galerkin finite element method with absorbing boundary condition under the slowly-vary-envelope approximation. On this basis, the mode of free propagation region was analyzed based on 3D full-vector beam propagation method, and the equation of weighted equivalent mode refractive index was deduced with guided-mode propagation analysis method. This method provides a useful theoretical tool for the determination of mode effective refractive index in the free propagation region of AWG.

Key words: finite element;　beam propagation method;　guided-mode propagation analysis method;　arrayed-waveguide grating

---

收稿日期:2012-12-10；　**修订日期**:2013-01-08

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2010CB328206);国家高技术研究发展计划(2008AA01Z15);
国家自然科学基金(60771008);重点实验室基金(9140C1203021106,9140C120301130C12051)

作者简介:刘志明(1982-),男,博士,主要从事应用于下一代光网络的新型特种光纤及其相关器件方面的研究。
Email:lzmskyweilai@163.com

0 引 言

从 1988 年 AWG 解复用器[1-3]出现至今,已有许多关于阵列波导光栅(AWG)设计工作的报道。目前关于 AWG 的设计,一般都采用传统的 Rowland 圆结构或者修正的 Rowland 圆结构,利用相差理论,采用几何光学方法设计出所要求的 AWG 的几何结构参数,然后利用数值方法或者半解析方法对其传输特性进行模拟,根据模拟结果调整 AWG 的几何结构参数,反复修正设计出符合要求的 AWG[4-5]。AWG 设计是围绕其光程函数(OPF)展开的。对于 AWG 的设计来说,输入端与输出端的自由传播区(FSR)的设计是其核心,而自由传播区的多模波导结构有效折射率 $\mathbf{n}_s$ 的确定成了首先需要解决的问题。然而,目前报道的 AWG 设计或模拟的文章,均没有给出物理意义明确的自由传播区有效折射率的表达方式[6-8]。类似的多模波导结构的分析出现在有关多模干涉(MMI)器件[9],由于其研究重点不同,导致其结论不能很好地解决这个问题。

针对这个问题,文中提出采用加权等效模式折射率作为自由传播区模式有效折射率的方法。利用三维全矢量有限元[10]结合束传播法(3D-FV-BPM)[11]对自由传播区进行模式分析,并利用改进的导模传输分析法,推导出多模波导结构的加权等效模式折射率的一般表达式。

1 基本方程

由 Maxwell 方程出发,可得到如公式(1)所示的磁场矢量方程:

$$\nabla\times(\mathbf{n}^{-2}\cdot\nabla\cdot \mathrm{H})-\mathbf{n}^2 k_0^2 \mathrm{H}=0 \tag{1}$$

式中:k_0 为自由空间波数;$\mathbf{n}=\mathbf{n}(x,y,z)$为波导横截面折射率分布,假定折射率分布 $\mathbf{n}(x,y,z)$随光的传播方向(z 向)缓慢变化,同时引入慢变包络近似,令磁场横向分量 H_t 为:

$$H_t=\mathbf{H}_t(x,y,z)\cdot e^{-jk_0\bar{n}z} \tag{2}$$

式中:$\bar{n}$为参考折射率。应用吸收边界条件,采用一阶三角单元划分网格,采用 Galerkin 法可以由公式(1)得到如下方程组:

$$[\mathbf{A}]_m[\mathbf{H}_t]_{m+1}=[\mathbf{B}]_m[\mathbf{H}_t]_m$$

$$[\mathbf{A}]_m=-2j\bar{n}k_0[\mathbf{L}]_m+\theta\Delta z\{[\mathbf{K}]_m-\bar{n}^2k_0^2[\mathbf{M}]_m\}$$

$$[\mathbf{B}]_m=-2j\bar{n}k_0[\mathbf{L}]_m+(\theta-1)\Delta z\{[\mathbf{K}]_m-\bar{n}^2k_0^2[\mathbf{M}]_m\}$$

$$[\mathbf{L}]=[\mathbf{M}]+\frac{1}{4\bar{n}k_0^2}\{[\mathbf{K}]-\bar{n}k_0^2[\mathbf{M}]\} \tag{3}$$

式中:$\mathbf{m}$ 为传输步长数;Δz 为计算步长;θ 为传输系数,在这里取 0.5;矩阵[**K**]和[**M**]的具体形式见参考文献[12]。

2 多模波导的模式分析

对于多模波导的模式分析,可以采用有限元法直接对公式(1)进行求解。但是如果波导所含有的模式过多,为了不漏解,所需划分的网格单元数量会大大增加,导致计算效率大大降低,而且很不容易判定是否漏解。采用虚位移束传播法便可以很好地解决漏解这个问题,因为它可以从基模开始,逐个解出每个高阶模的有效折射率来,并且可以保证精度。所谓的虚位移束传播法就是将传统的束传播法的传输方向延 $z=j\tau$(τ 为实数)传输,通过传输的方法滤除掉高阶模而获得低阶模的方法。因此令公式(3)中的 $\Delta z=j\Delta\tau$,即可得到虚位移束传播法的迭代公式。一般选芯区和包层折射率的平均值作为参考折射率,传输一定长度 τ 直至光场稳定后,基模的模式折射率 $\mathbf{n}_{m=1}$ 可以表示为:

$$\mathbf{n}_{m=1}=\bar{n}+\frac{\ln\left[\int_s \mathbf{H}_t(x,y,\tau+\Delta\tau)\mathrm{d}s\right]-\ln\left[\int_s \mathbf{H}_t(x,y,\tau)\mathrm{d}s\right]}{k_0\Delta\tau} \tag{4}$$

得到基模模式折射率后,在初始激励中减去该项,然后重新开始计算,可获得次高阶模,以此类推,其余高阶模均可求得。

3 加权等效折射率的推导

在进行 AWG 设计时,即使是在做忽略 $\mathbf{n}_s$ 随波长的变化的近似下,$\mathbf{n}_s$ 也必须是一个确定的常数,才可以采用相差理论进行设计。然而 FSR 属于多模波导结构,因此,必须合理定义 $\mathbf{n}_s$。对于给定结构参数的多模波导,均可求解出感兴趣的各阶模式分布及其模式折射率,并且给定波导输入光场,便可以迭代出波导输出光场的场强分布。但是单纯的束传播法不能给出一个物理意义明确的 $\mathbf{n}_s$ 的表达式用以

AWG 的分析。为了解决这个问题,结合基本方程和多模波导模式分析的理论，对传统的导模传输分析法作以改进，提出加权等效折射率的概念并用其作为 FSR 的 n_s。

FSR 中的辐射模相对于基模及高阶模而言，其能量不会耦合进入 AWG 的阵列波导中,因此可忽略辐射模的影响,设多模波导在任一截面上的场分布为 $H_t\cdot e^{-jk_0n_sz}$,则其写成所有导模的叠加后,可表示为：

$$H_t\cdot e^{-jk_0n_sz}=\sum_{m=1}^{N}C_m\vec{H}_{tm}(x,y,z)\cdot e^{-jk_0n_mz}\qquad(5)$$

式中：N 为多模波导所含模式数；n_m 为第 m 个模式的模式折射率；C_m 为第 m 个模式的激励因子；$H_{tm}(x,y,z)$ 为第 m 个模式的功率归一化场分布函数。为了表示方便,记 $H_t(x,y,z)$ 为 $H_t(z)$, $H_{tm}(x,y,z)$ 为 $H_{tm}(z)$。将公式(5)与 H_{tm} 进行点积并在整个波导横截面上进行积分,由模式的正交性理论,可得：

$$C_m=\frac{\int\frac{1}{n^2}\cdot(H_t(z)\cdot H_{tm}^*(z))dxdy}{\int\frac{1}{n^2}\cdot(H_{tm}(z)\cdot H_{tm}^*(z))dxdy}\cdot e^{-jk_0(n_s-n_m)z}\quad(m=1,\cdots,N)\qquad(6)$$

然而到目前为止 n_s 还是一个未知数,因此还不能采用公式(6)求解得到 C_m。对公式(5)关于 z 进行求导,忽略 H_t 和 H_{tm} 在 z 方向上的变化,可以得到：

$$n_s\cdot(H_t\cdot e^{-jk_0n_sz})=\sum_{m=1}^{N}n_m\cdot(C_mH_{tm}(x,y,z)\cdot e^{-jk_0n_mz})\qquad(7)$$

将公式(8)与其共轭进行点乘并在波导横截面上积分,由模式正交性理论整理可得：

$$n_s=\sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{N}\left[n_m^2\cdot|C_m|^2\cdot\int_s\frac{1}{n^2}\cdot(H_{tm}\cdot H_{tm}^*)dxdy\right]}{\sum_{m=1}^{N}\left[|C_m|^2\cdot\int_s\frac{1}{n^2}\cdot(H_{tm}\cdot H_{tm}^*)dxdy\right]}}\qquad(8)$$

公式(8)为加权等效折射率的表达式,可以看出, n_s 是通过对波导所含所有导模的模式折射率以各个导模的功率为加权因子进行方均跟统计得到的。公式(8)表明,在计算 n_s 时,用到了 C_m 的模的平方,而并非 C_m,以此通过公式(6)可得 $|C_m|$ 的表达式：

$$|C_m|^2=\left|\frac{\int\frac{1}{n^2}\cdot(H_t\cdot H_{tm}^*)dxdy}{\int\frac{1}{n^2}\cdot(H_{tm}\cdot H_{tm}^*)dxdy}\right|^2\qquad(9)$$

传统的导模分析法,在 $z=0$ 的时候对与 $|C_m|$ 的求解,再利用公式(8)就可以很方便得出 n_s。然而对与 FSR 的 n_s 的求解,是不适合的,因为在 $z=0$ 的时候,场还没有或者说刚进入 FSR，此时谈其在 FSR 的传输常数是没有意义的, n_s 应该是反映光场在 FSR 中进行传播时的特性。因此,应该采用的是输出场与各个导模的关系,即 $z=L$ 的时候(L 表示 FSR 的长度)。因为只有当光场通过 FSR 后，其才携带有 n_s 的信息,也即,由于在光场刚进入自由传播区到传播到自由传播区的输出端，需要经过模式激发和模式间耦合等复杂的过程,如果采用输入场进行计算,就忽略了光场在 FSR 中的模式间耦合的问题，是不合理的,这就是对传统的导模分析法所做的改进。

由于上述计算结果只是采用了慢变近似,并不影响模式的正交性结论成立,因此公式(8)和公式(9)可以采用其计算结果,在此基础上 FSR 的模式折射率可以表示为：

$$n_s=\sqrt{\frac{\sum_{m=1}^{N}\left[n_m^2\cdot|C_m|^2\cdot\int_s\frac{1}{n^2}\cdot(H_{tm}\cdot H_{tm}^*)dxdy\right]}{\sum_{m=1}^{N}\left[|C_m|^2\cdot\int_s\frac{1}{n^2}\cdot(H_{tm}\cdot H_{tm}^*)dxdy\right]}}\qquad(10)$$

其中 $|C_m|^2$ 为：

$$|C_m|^2=\left|\frac{\int\frac{1}{n^2}\cdot(H_t(z)\cdot H_{tm}^*(z))dxdy}{\int\frac{1}{n^2}\cdot(H_{tm}(z)\cdot H_{tm}^*(z))dxdy}\right|^2\qquad(11)$$

公式(10)即为阵列波导光栅设计中自由传播区模式有效折射率的加权等效模式折射率的表示方法。

4 结 论

文中针对阵列波导光栅设计中自由传播区模式折射率的确定问题，提出了一种采用加权等效模式折射率作为自由传播区模式折射率的方法。从 Maxwell 方程出发,引入慢变包络近似条件,通过采用吸收边界条件的一阶 Galerkin 有限元法，给出了阵列波导光栅自由传播区仅含有磁场分量的全矢量波动方程组,在此基础上,利用三维全矢量束传播法对自由传播区进行了模式分析，最后结合导模传输分析法,推导出了加权等效模式折射率的表达式,为阵列波导光栅设计过程中自由传播区模式折射率的确定提供了一个理论依据。

参考文献：

[1] Yuan Rong. Arrayed waveguide grating component and its applications [J]. Optical Communication Technology, 2010 (1): 1-5. (in Chinese)
原荣. 阵列波导光栅(AWG)器件及其应用[J]. 光通信技术, 2010(1): 1-5.

[2] Chen Qiaohong, Huang Xuguang, Xu Wencheng. Arrayed-waveguide grating component and its applications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005, 42(4): 20-24. (in Chinese)
陈巧红, 黄旭光, 徐文成. 阵列波导光栅器件及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(4): 20-24.

[3] Liu Wenjen, Cheng Hsinyen, Lin Jyungdong, et al. Fabrication of amorphous silicon films for arrayed waveguide grating application[J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 201(15): 6581-6584.

[4] Dai D, Liu L, Wosinski L, et al. Design and fabrication of ultra-small overlapped AWG demultiplexer based on a-Si nanowire waveguide[J]. Electronics Letters, 2009, 42(7): 400-402.

[5] Liu Zhiming, Li Jian, Jiang Weiwei, et al. An modified algorithm based on Fourier optics for modeling of arrayed waveguide grating[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2010, 34(6): 76-80. (in Chinese)
刘志明, 李坚, 江微微, 等. 用于阵列波导光栅设计的傅里叶光学修正算法[J]. 北京交通大学学报, 2010, 34(6): 76-80.

[6] Zhou Qincun, Dai Daoxin, He Sailing. Simulation of arrayed waveguide gratings using a finite diderence beam propagation method[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(12): 1313-1319. (in Chinese)
周勤存, 戴道锌, 何赛灵. 基于 FD-BPM 方法的阵列波导光栅模拟[J]. 半导体学报, 2002, 23(12): 1313-1319.

[7] Takiguchi K, Okamoto K, Sugita A. Arrayed-waveguide grating with uniform loss properties over the entire range of wavelength channels[J]. Opt Lett, 2006, 31(4): 459-461.

[8] Huang Nairong, Wang Qian, He Sailing. Study of AWG based on MMI [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(4): 413-416. (in Chinese)
黄耐容, 王谦, 何赛灵. 基于多模干涉耦合器的阵列波导光栅设计研究[J]. 光子学报, 2003, 32(4): 413-416.

[9] Yan Chaojun, Wan Junli, Qin Qin. Design of mode converter-combiners based on multimode interference couplers [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2008, 6(5): 88-90. (in Chinese)
严朝军, 万钧力, 覃琴, 一种基于多模干涉耦合器的模转换与合并器件的设计[J]. 光学与光电技术, 2008, 6(5): 88-90.

[10] Zhang Fangdi, Liu Xiaoyi, Zhang Min, et al. A full-vector FEM model and its application to optical waveguides and hotonic crystal fibers[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(2): 209-215. (in Chinese)
张方迪, 刘小毅, 张民, 等. 全矢量有限元模型及其在光波导和光子晶体光纤中的应用[J]. 光子学报, 2007, 36(2): 209-215.

[11] Xiao Jinbiao, Liu Xu, Cai Chun, et al. Modified 3D full-vector finite difference virtual displacement beam propagation method[J]. Science in China(Series E: Information Sciences), 2006, 36(12): 1456-1471. (in Chinese)
肖金标, 刘旭, 蔡纯, 等. 改进的三维全矢量有限差分虚位移束传播法品 [J]. 中国科学 (E辑: 信息科学), 2006, 36(12): 1456-1471.

[12] Obayya S S A, Rahman B M A, El-Mikati H A. New full-vectorial numerically efficient propagation algorithm based on the finite element method [J]. Journal of Lightwave Technology, 2000, 18(3): 409-415.