利用 ZEMAX 软件分析光器件中的 PDL

张 博¹, 刘 文^{1,2}

(1. 光纤通信技术和网络国家重点实验室 武汉光迅科技股份有限公司,湖北武汉 430074;
 2. 华中科技大学 武汉光电国家实验室,湖北武汉 430074)

摘要: 文章简要介绍了常用的偏振相关损耗(PDL)的计算和分析方法,在此基础上利用 ZEM AX 软件的 POLA RIZ AT ION A-NALYSIS(偏振分析)功能对光器件的 PDL 进行了分析和计算,并且与常用数学软件的计算结果和实际器件的测量结果进行 了比较,证明了利用 ZEM AX 软件模拟计算和分析光器件 PDL 的可行性和准确性,说明了利用 ZEM AX 软件不仅可以提高设 计人员的工作效率,而且能取得精确的计算和分析结果。

关键词:偏振相关损耗; ZEMAX 软件; 偏振分析; 穆勒矩阵

中图分类号: T N256 文献标识码: A 文章编号: 1005-8788(2008) 04 0044-04

Analysis of PDL in optical components by using ZEMAX

Zhang Bo¹, Liu Wen^{1,2}

(1. SKL of OCTN, Accelink Technologies Co., Ltd., Wuhan 430074, China;

2. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract: We first briefly introduce the commonly used calculation and analysis methods for Polarization-Dependent Losses (PDL) and conduct the analysis and calculation of the PDL of optical devices by using the Polarization Analysis function of ZE-MAX. Then we compare the measurement results of the practical devices with the computed results by using the commonly used mathematic software, which prove the feasibility and accuracy of this method and show that it is possible not only to improve the designers' working efficiency, but also to obtain accurate calculation and analysis results by using ZEMAX. **Key words:** PDL; ZEMAX; polarization analysis; Mueller matrix

随着传输速率的不断提高,光纤通信系统对光 学器件中偏振相关损耗(Polarization Dependent Loss, PDL)的要求也越来越高,因此在光器件的设 计过程中,设计人员也加强了对 PDL 的控制。设计 中的各种细微改动,比如角度、材料和膜系等,都可 能影响到 PDL,虽然现在设计人员利用 MATLAB、 MATHCAD 等常用数学软件能够计算出这些影 响,但是需要大量繁琐的计算,比起专业的光学设计 软件如 ZEMAX、CODE V 来说,效率还是低了很 多。使用专业的光学设计软件时,只需改动几个设 置的参数,就可以得到所需的各种数据,其方便、快 捷、直观是其他数学软件所无法比拟的。

1 常用的 PDL 分析方法

由于光器件的 PDL 受很多因素的影响,不同类型的器件,其 PDL 的产生机理也不同。在折射率突 变界面,光波的不同偏振分量在界面上的反射和透 射系数是不同的,光信号通过折射率为 n1 的介质入 射到折射率为 n2 的介质时,由于许多光器件会采用 带倾角的输入输出端面增加回损,所以两偏振态的 反射系数和透射系数会因为光线垂直和平行入射面 分量强度的不同而不同。这种不同的反射系数和透 射系数会导致传输损耗的差异,也就造成了 PDL。 例如,一个倾角为 8°的 SF11 玻璃斜面会产生 0.02 dB左右的 PDL。还有一种是由双折射现象引 起的 PDL。对于许多光器件,例如隔离器、环形器, 经常都会用到双折射体。在双折射晶体中, 0 光和 E 光对应着不同的偏振态,随着入射角度的变化, E 光的折射率和折射角也在发生着变化,这就导致了 两偏振态在不同的入射情况下,透射系数在垂直和 平行于主轴的方向有着不同值,结果产生不同的传 输损耗。通过在晶体表面镀膜可以大大减小 0 光 和 E 光之间透射系数的差异,从而减小 PDL,但是 并不能完全消除 PDL。

下面介绍一种常用的计算 PDL 的方法^[1]。假 设 *E*_i, *E*_i, 分别代表入射光 s、p 分量的复振幅, *E*_is、 *E*_i, 分别代表透射光 s、p 分量的复振幅, θ 为入射角, θ 为折射角, *n*₁ 为入射面的折射率, *n*₂ 为折射面的折 射率, 则有

$$t_{s} = \frac{E_{ts}}{E_{s}} = \frac{2\sin\theta\cos\theta_{i}}{\sin(\theta_{i} + \theta_{i})} \quad , \tag{1}$$

$$t_{\rm p} = \frac{E_{\rm tp}}{E_{\rm ip}} = \frac{2\sin\theta\cos\theta}{\sin(\theta + \theta_{\rm i})\cos(\theta - \theta_{\rm i})} \quad . \tag{2}$$

s 光和 p 光相对应的入射光强的透射率分别为

收稿日期:2007-11-28

作者简介:张博(1983),男,湖南湘乡人,硕士研究生,主要研究方向为无源光器件。

$$T_{s} = \frac{E_{1s}^{2}}{E_{is}^{2}} \cdot \frac{n_{2}\cos\theta_{i}}{n_{1}\cos\theta_{i}} = |t_{s}|^{2} \frac{n_{2}\cos\theta_{i}}{n_{1}\cos\theta_{i}}, \qquad (3)$$
$$= \frac{E_{1p}^{2}}{n_{2}\cos\theta_{i}} + \frac{n_{2}\cos\theta_{i}}{n_{1}\cos\theta_{i}}, \qquad (3)$$

$$T_{\rm p} = \frac{E_{\rm tp}}{E_{\rm p}^2} \cdot \frac{n_2 \cos \alpha}{n_1 \cos \theta_{\rm i}} = |t_{\rm p}|^2 \frac{n_2 \cos \alpha}{n_1 \cos \theta_{\rm i}} \circ (4)$$

因此, 根据 PDL 的定义, 在单一界面产生的 PDL 为 $PDL = - | (-10 \lg T_s) - (-10 \lg T_p) | =$

 $- 20lg[\cos(\theta - \theta)], \qquad (5)$ 其中, θ_i 和 θ_i 满足折射定律

モ〒,リi ᡣi リi /两ルカl 別ル1手

 n1sinθ = n2sinθ
 .
 (6)

 通过上面的公式,我们可以计算出光器件的

 PDL。但是在对光器件的 PDL 进行计算时,要注意

光器件总的 PDL 并不是简单地将几个界面或者光 学部件的 PDL 相加, 而是要考虑很多因素。 如图 1 所示, 对于一个偏振分束器来说, 假设其

材料为YVO4,斜面角度为6°,光轴与底面成45°



, 元福与底面风 4.5
 角, 界面镀有 1/4 波长
 的 M G F₂ 膜。考虑到
 双折射的影响, 我们要
 分别计算 O 光和 E 光
 的透过率, 特别是对于
 E 光, 要考虑不同入射
 角度对 E 光折射角和

折射率的影响。利用光在晶体表面的折射定理和薄 膜光学中的导纳矩阵, 可以计算出入射光经过这个 偏振分束器后的 PDL 为 0.011 2 dB。

我们按照图 2 所示的方式放置两个偏振分束 器,并在两个偏振分束器之间放入一个半波片,使得 由第 1 个偏振分束器分出的 O 光和 E 光的偏振方 向各自旋转 90°,然后再由第 2 个偏振分束器进行 合光。经过计算我们可以发现,整个系统的 PDL 为 0 dB,并不是两个偏振分束器 PDL 的和。可见,当 光器件的内部结构发生变化时,我们需要从整体考 虑,重新计算该器件的 PDL。





从以上描述我们可以看出,分析器件的 PDL 时 要综合考虑各种因素,比如材料的折射率、入射角 度、晶体端面的镀膜情况以及晶体的摆放方式等。 如果通过一些数学软件比如 MATLAB、MATH-CAD 来计算,则会比较麻烦,但是如果采用 ZEM-AX 软件进行计算,则会方便很多。

2 利用 ZEMAX 软件辅助分析

利用 ZEMAX 软件中的 POLARIZATION A NALYSIS(偏振分析)功能,我们能够得到不同偏振 态的光在经过各光学部件界面时的详细情况,也可 以得到一种偏振态的光经过全部界面后的详细情 况,比如各个偏振分量在每个界面的折射角度、偏振 方向、位相、振幅比和透射系数等,利用所得到的数 据,结合 PDL 的计算和测量方法,我们可以很方便 地计算出该模型的 PDL。

这里我们采用扫描法和四态法来计算 ZEMAX 中光器件的 PDL。

(1) 步进扫描法^[2](确知的全状态扫描法)

步进扫描法是根据 PDL 的定义进行测试的,所 以是最基本的方法。其原理是控制输入光扫过全部 的偏振态,然后取接收端光功率最大值和最小值之 间的差值,利用公式

 $PDL = 10lg(T_{max}/T_{min})$, (7) 计算出该器件的 PDL。由于我们在 ZEMAX 软件 中可以精确地控制输入光的偏振态,所以采用 ZE-MAX 软件中的 POLARIZATION ANALYSIS 功 能可以取得各个偏振态下光的透过系数,然后根据 式(7)就可以很方便地得到比较精确的计算结果。 但对于复杂的光器件,当需要计算多个波长的影响, 或者需要提高偏振态采样精度时,计算机的计算速 度就会明显下降。所以步进扫描法一般用于模拟简 单的器件或者单波长器件。

(2) 四态法^[3](穆勒矩阵法)

四态法主要利用偏振光的 4 个状态并结合穆勒 矩阵方程获得被测光器件的 PDL。其测试过程分 两步: 首先,不加被测光器件,计算机控制偏振控制 器分别产生(a) 0°水平线偏振光、(b) 90°垂直线偏 振光、(c) 正 45°线偏振光和(d) 右旋圆偏振光,读出 每个偏振态对应的光功率 P_a 、 P_b 、 P_c 及 P_d 。然后,把 被测光器件放入光路,计算机控制偏振控制器重新 产生以上 4 种偏振态,读出经过被测光器件后的 4 种偏振光对应的光功率 P_1 、 P_2 、 P_3 及 P_4 。把 P_a 、 P_b 、 P_c 、 P_d 、 P_1 、 P_2 、 P_3 及 P_4 代入穆勒矩阵方程,可以得 到下面的矩阵:

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\begin{pmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ m_{13} \\ m_{14} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \left(\frac{P_1}{P_a} + \frac{P_2}{P_b} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{P_1}{P_a} - \frac{P_2}{P_b} \right) \\ \frac{P_3}{P_c} - \frac{1}{2} \left(\frac{P_1}{P_a} + \frac{P_2}{P_b} \right) \\ \frac{P_4}{P_d} - \frac{1}{2} \left(\frac{P_1}{P_a} + \frac{P_2}{P_b} \right) \end{pmatrix} , \quad (9)$$

那么,透过率 T 的最大值和最小值分别为

 $T_{\max} = m^{11} + \sqrt{m^{22} + m^{23} + m^{24}}, \quad (10)$ $T_{\min} = m^{11} - \sqrt{m^{22} + m^{23} + m^{24}}, \quad (11)$

于是,可用式(7)求得 PDL。

同样,我们可以在 ZEM AX 软件中控制输入光 产生以上 4 种偏振态,由于在 ZEM AX 软件中是一 个理想的状态,没有其他的相关损耗,所以可以认为 P_a 、 P_b 、 P_c 及 P_d 都为 1。然后利用 ZEM AX 中的 POLARIZATION ANALYSIS 功能,得到 4 种偏振 态的光再经过光器件模型后的光强透射系数(即归 一化的光功率) P_1 、 P_2 、 P_3 及 P_4 ,按照上述的步骤进 行计算,我们可以得到精确的 PDL 值。使用四态法 的好处是能够快速实现多个波长的计算,它适合复 杂的多个波长的器件模型分析,能够大大减少计算 机的运行时间。

以上面的模型为例, 当采用一个偏振分束器时, 从 ZEMAX 软件模拟的计算结果可以发现: 使用扫 描法得到的最大透过率为 0. 999 4, 最小透过率为 0. 996 4, 按照 PDL 定义可得该模型的 PDL 为 0. 013 dB; 使用四态法得到 4 个偏振态下的透过率 分别为 0. 999 4, 0. 996 4, 0. 997 9 和 0. 997 9, 经过 公式计算可得该模型的 PDL 为 0. 013 dB。当采用 图 2 所示的两个偏振分束器进行计算时, 计算结果 都为 0 dB。我们可以发现, 采用 ZEMAX 计算出来 的结果与运用数学软件计算的结果只相差 0. 002 dB, 基本上是吻合的。

ZEMAX 软件自带丰富的玻璃库,可以得到与 实际比较符合的材料数据, ZEMAX 软件还可以方 便地模拟界面镀膜的情况,比如在上面的模型中,双 折射晶体的端面都设定为 AR 膜(1/4M GF² 膜)。 除了软件中自带的一些常用膜系,ZEMAX 还支持 设计者自定义膜系,方便我们对光器件内部的膜系 进行修改和分析。

为了提高效率,我们还可以通过 ZEMAX 软件 中自带的宏命令来编制一个通用的测量 PDL 的宏, 使用这个宏我们不必提取数据,就可以在 ZEMAX 软件的内部进行计算,直接得出 PDL 的值,大大提 高了工作效率。

3 实际利用 ZEM AX 软件进行分析 的结果

图 3 所示为利用 ZEMAX 软件建立的可调光 功率分配器(VOPS)模型和宏命令窗口。



图 3 利用 ZEMAX 软件建立的 VOPS 模型 和宏命令窗口

由于在模型中存在多个 CONFIG(操作数),为 了减少计算时间,我们采用四态法进行计算,利用编 制的宏命令可以得到该器件的详细信息。可见在该 模型中插入损耗(IL)为0.2091 dB,PDL为 0.014 dB。在实际器件的测试中,VOPS 的IL为 0.302~0.65 dB,PDL为0.029~0.12 dB。由于在 模型中没有加入准直器,考虑到准直器自身包含的 0.1~0.2 dB 的IL和0.01~0.02 dB 的 PDL,可见 用 ZEMAX 软件模拟的结果是比较接近实际测试 结果的,模拟值近似地等于器件各项指标的最佳值。

此外,我们还可以分析模拟公差带来的影响。 图 4 所示为模拟 VOPS 中第 1 个偏振分束器在装



图 4 模拟公差对VOPS 的 PDL 的影响 配过程中的误差导致的 PDL 变化的情况。图中,横 坐标表示偏振分束器分别绕x 轴和y 轴旋转的角 度,范围为 \pm 0.5°,纵坐标表示器件的 PDL。通过 图 4,我们可以很清楚地看出角度偏差对于器件 PDL 的影响。通过 ZEMAX 软件,设计人员可以根 据各种情况来设定自己想要计算的公差, 得到各种 直观的图解, 这里由于篇幅的限制不再一一列举。

4 结束语

从上文我们可以看出,利用 ZEMAX 软件对光 器件进行模拟和分析,能够取得很好的效果。当需 要改变光器件的设计时,我们只需对个别的参数进 行修改,不需要重新计算,就可以得到新的计算结 果。由于有各种厂家提供的真实的玻璃材料数据, 我们可以更好地模拟真实的情况,提高了计算的精 度。使用 ZEMAX 软件的诸多分析功能,我们还能 得到很多其他有用的信息,比如耦合效率和光斑分 布等,还可以运用 ZEMAX 软件自带的优化功能改进设计,使用公差来模拟实际的器件情况,大大提高设计人员的工作效率。

参考文献:

- [1] 林学煌. 光无源器件 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002.
- [2] Stolze G. 无源光器件偏振相关损耗测量 [J]. 世界电子元器件, 2003, (10): 74-75.
- [3] 王恒飞,应承平,全治科.光无源器件偏振依赖损耗的 测试方法 [J].光子技术,2005,9(3):142-143.

(上接第24页)

与其他的可编程器件相比, FPGA 寄存器资源 比较丰富,适合做同步时序电路较多的设计。Virtex 系列 FPGA 器件是大容量、高性能的 FPGA 器 件,本文采用了 Virtex II 系列的 XC2V2000 产品。

4 仿真与综合结果

对本文中的设计用 Verilog HDL 语言进行描述,采用 Mentor Graphics 公司的 Modelsim 软件进行仿真,可以正确地完成数据的加密和解密。使用 Xilinx 公司的 ISE 工具在XC2V2000 的工艺库上进 行综合,关键路径延时为 3.097 ns,共用了 8 828 个 等效门(2 输入 1 输出的与非门),在 10 MHz 的低 频率下,加、解密的速率可以达到 600 M bit/s。与已 有文献[2~4]中所述方法的比较见表 1。

方法	器件	Slices	<u>频率</u>	吞吐率
		(逻辑片)	$\rm MHz$	M bit/s
文献[2]	Virtex	2 902	25.9	331
文献[3]	XCV1000 BG560	17 314	28.5	3 650
文献[4]	XCV 1000-4	10 992	31.8	1 938
本文方法	XC2V2000	8 828	10.2	652.8

表1 不同方法的比较

5 结束语

本文在研究 AES 加、解密算法的基础上, 根据 其轮加密操作的特点, 设计了多轮加密在一个时钟 周期内完成的新方法, 在不增加硬件的前提下, 采用 了3级流水线设计,从而以较小的硬件代价获得了 较高的加、解密速率。该方法可以以较低的时钟频 率完成高速AES算法的硬件加密,可以适用于旧系 统的改造,以及其他一些低频AES加密的环境。

由于采用流水线实现的前提条件是前后数据不存在相关,所以该实现方法只能用于电子密码本 (ECB)或计数(CTR)模式,不能用于密码分组链 (CBC)模式。

参考文献:

- US DoC / NIST-2001, Advanced Encryption Standard (AES) [S].
- [2] Gaj K, Chodowiec P. Comparison of the Hardware Performance of the AES Candidates Using Reconfigurable Hardware [A]. The Third Advanced Encryption Standard(AES) Candidate Conference [C]. New York, USA: NIST, 2000. 40-54.
- [3] Sklavos N, Koufopavlou O. Architectures and VLSI implementations of the AES-Proposal Rijndael [J].
 IEEE Trans. on Computers, 2002, 51(12): 1 454-1 459.
- [4] Elbirt A J, Yip W, Chetwynd B, et al. An FPGA Based Performance Evaluation of the AES Block Cipher Candidate Algorithm Finalist [A]. The Third Advanced Encryption Standard(AES) Candidate Conference [C]. New York, USA: NIST, 2000. 13-27.