

文章编号: 1001-3806(2003)05-0480-04

薄膜均匀性的有限元算法

谭旭东¹ 马 孜² 蔡邦维¹

(¹四川大学电子信息学院,成都,610064) (²西南技术物理研究所,成都,610041)

摘要:应用有限元方法模拟计算了镀膜系统平行平面转盘在不同转速以及不同的镀膜时间下波分复用(DWDM)系统介质滤光片的成膜均匀性。结果表明,针对不同的膜料,合理选择转速和控制镀膜时间能够提高薄膜成膜的均匀性。

关键词:薄膜;均匀性;有限元;转速

中图分类号: O484.4⁺¹ **文献标识码:** A

Simulating uniformity of film thickness with finite-elements method

Tan Xudong¹, Ma Zi², Cai Bangwei¹

(¹ College of Electronics Information, Sichuan University, Chengdu, 610064)

(² Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, 610041)

Abstract: In this paper, finite-elements method is used to simulate the film thickness uniformity at different rotation and different time. The result shows that the uniformity of film thickness can be improved if the rotation and time are selected properly.

Key words: thin film; uniformity; finite-elements; rotation

引 言

波分复用器件(DWDM)是提高光通信容量的一种重要器件,介质干涉滤光片型 DWDM 是目前用得较为广泛的一种器件。其中窄带滤光片的制备是这种 DWDM 中的关键技术,成膜的均匀性是其中很重要的一项,除影响到整个器件的光学特性外,对滤光片的成品率和成本有非常重要的影响。

电子束成膜的均匀性问题在许多文献中都有所讨论。顾培夫、杨邦朝等人^[1,2]讨论了平面和球面旋转夹具的均匀性,阴晓俊等人^[3]讨论了行星轮夹具系统的均匀性。除镀膜机结构外,基片转速、真空度、电子枪和材料特性、离子源等都是需要考虑的因素。尤以 DWDM 滤光片对薄膜的均匀性有极高的要求,0.01%的均匀性差别都会有很大的影响,0.02%的均匀性差别会使滤光片通带形状严重劣化。

不同于传统的积分型均匀性计算方法,文中利用有限元法,从理论上计算分析了平面旋转夹具基

片的转速和镀膜时间的变化与薄膜均匀性的关系,所得的结果对 DWDM 滤光片的成膜条件选择有指导意义。

1 机器结构和相关参数

以德国莱宝 APS1104 DWDM 镀膜机为例,真空室结构配置如图 1 所示。

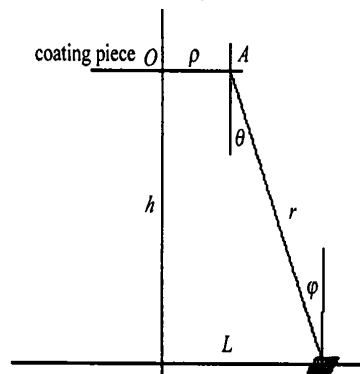


Fig. 1 Configuration of plane rotate plate

基片以 (r/min) 的转速绕轴旋转,假设旋转方向为逆时针。结构参数为:坩埚与中心转轴距离 $L = 310\text{mm}$,基片高 $h = 550\text{mm}$; ρ 表示基片上一点 A 对转轴中心的距离;假设 H 膜料的发射特性参数 n 取 1.6, L 膜料的发射特性参数 n 取 2.3;基片中心沉积速率分别为:H 膜料 0.6nm/s , L 膜料 1.5nm/s ;

作者简介:谭旭东,男,1977 年 5 月出生。硕士研究生。主要从事激光与光通信技术的研究。

收稿日期:2003-01-07;收到修改稿日期:2003-05-23

取 1550nm 为参考波长,一般镀膜的时间为:H 膜料 360s 左右,L 膜料 180s 左右。

距离基片中心为 r 处的 A 点的薄膜厚度可表示为:

$$d = c \int_0^t \frac{\cos^n \theta}{r^2} d(2 - t) \quad (1)$$

式中, c 为比例常数, n 即蒸发膜料的发射特性参数,其它参数如图 1 所示。这是传统的积分法计算薄膜厚度均匀性的表达式,由于 n 的存在对积分的解析求解带来很大的困难,所以,下面采用有限元方法代替传统的积分法来计算薄膜的厚度均匀性问题。

2 有限元方法计算薄膜均匀性

2.1 沉积速率修正与膜厚计算

基片上不同点的膜料沉积速率不一样,以基片中心的沉积速率为参考点,对基片中心以外的点进行沉积速率的修正。假设基片中心薄膜沉积速率为 v_0 ,可以利用下式计算距离基片中心为 r 的 A 点的沉积速率:

$$v = v_0 \frac{r_0^2 \cos^n \theta}{r^2 \cos^n \theta} \quad (2)$$

式中, r , r_0 的定义如图 1, θ_0 , θ , r_0 为 $r = 0$ 时, r 的值。

由(2)式,在 t 时间内该点的薄膜厚度为:

$$d = v \cdot t \quad (3)$$

这时,由总的镀膜时间 T 可以得到该处薄膜的总厚度为:

$$d = \int_{t=0}^T v \cdot t \quad (4)$$

(4)式是利用有限元方法来计算薄膜厚度的基本表达式。其基本的物理思想是:空间上把基片离散成为很多小单元,可以用坐标 (x, y) 来表征,如图 2 表示,其中黑色处为基片中心且在转轴上。基片在转动时,所求的单元是以中心为转轴转动的。可以取基片上任一点为转动的起始位置(参考位置即时间的起始点取图 1 中的 OA 位置),以 t 为一个时间间隔,不同的时刻该单元转动到不同的位置,计算在这些位置上该小单元的薄膜厚度,然后在总的镀膜时间内求和就可以得到该小单元的薄膜厚度(这里假设镀膜过程中 v_0 保持不变)。一般文献中对薄膜均匀性的比较都是在基片一个特定的径向上进行的,而且只是就一圈里面进行积分,这往往不能很好地对整个基片的均匀性分布做出正确的分析。本文中的方法即克服这个缺点,讨论在整个基片面积上

转动机构转过并非整数圈的问题。视基片的大小取空间离散单元,比如在 20×20 的基片上取空间单元为 400 ,时间间隔取 $0.01s$ 可以得到很光滑的曲线。下面应用该方法对薄膜均匀性进行了模拟。

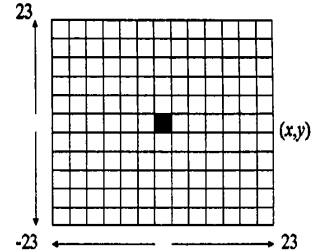


Fig. 2 Elements of coating piece (mm)

2.2 膜料发射特性不同引起的均匀性差别

在镀膜所用的材料当中,由于材料不同导致它们的发射特性参数也不同。在本文中分别取 $H: n = 1.6$ 和 $L: n = 2.3$ (假设镀膜过程中材料发射特性不变)。图 3 是这两种膜料的均匀性曲线分布图。此时假定转过的圈数为整数,故同一个位置上的均匀性差不多相同(实际上也并不相同,这由下面的模拟得知,不过影响比较小,在此认为相同)。所取的起始位置为图 1 中的 OA 位置。

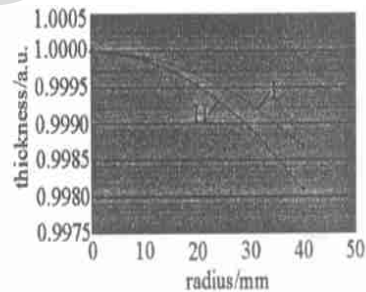


Fig. 3 Distribution of uniformity of the H and L coating

由图 3 可见,针对 APS1104 这种结构,在相同的参数和工作条件下,对于小尺寸的器件,比如 $\varnothing 10mm$,H 与 L 膜料的均匀性曲线十分接近,而随着器件尺寸的增大,L 膜料的成膜均匀性要比 H 膜料好。H 膜料的均匀性分布曲线降落的较快,对于 100G 的 DWDM 系统,以 1550nm 为参考波长时,一般要求均匀性误差不大于 0.02%。从曲线上的数据来看,在不采用其它特殊措施(如加挡板、放置离子源等)的情况下,如果要求两种膜料的均匀性差别不超过 0.02%,则 100GHz 滤光片有效面积不会大于 $\varnothing 46mm$,所以下面的计算取半径最大为 23mm。由此,可以知道膜料发射特性限制了 DWDM 滤光片的成品率。

2.3 不同转速下薄膜的均匀性分布

不同的转速会导致相同距离上不同起始点的均

均匀性不一样,同样影响基片整体的均匀性。为了能对基片的均匀性有一个整体的认识,下面从三维空间上对L膜料进行模拟。所取参数如下: $n = 2.3$, $T = 120s$ 。长度单位均为mm。

2.3.1 转动机构刚好转过整数圈的情况 对720r/min进行模拟的均匀性空间分布等高线如图4所示。30r/min和1500r/min的情况同样可以得到。表1是不同转速下基片水平与垂直方向上边缘处($r = 23mm$)与基片中心薄膜相对厚度的比值。

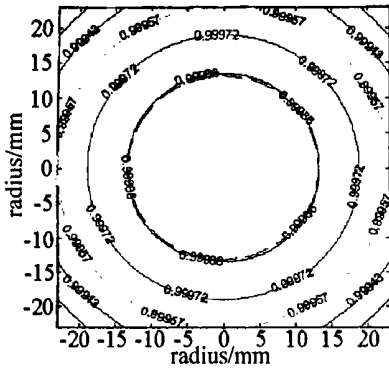


Fig. 4 Distribution of equal-value uniformity of L coating at 720r/min

Table 1 Data at $r = 23mm$

rotation	thickness/ a. u. at $r = 23mm$	
	horizontal	vertical
30r/min	0.99958	99.957
720r/min	0.99958	99.957
1500r/min	0.99958	99.958

由模拟结果知道,当转动机构在镀膜的总时间内刚好转过整数圈的时候,在这几个转速下,基片上薄膜均匀性分布趋势在某些方向上并无明显的差别,这可从表1有所了解。虽然如此,但从图4还是可以看到细微差别的,基片上均匀性相同的地方并不是一个严格的圆分布,而是一个椭圆形分布,在低速的情况下表现更明显,这主要是因为转动起点不一样所致。不过在转整数圈的情况下,椭圆的长短轴差别很小,大概在(0.5~0.8)mm之间。图4中内环(薄膜的相对厚度均为0.99986)虚线是真正的圆,3种转速下虚线圆区别并不明显,但半径是有区别的,在30r/min时虚线圆的半径是13.1mm,720r/min和1500r/min时虚线圆的半径均为13.2mm,而在1500r/min时同一个距离上均匀性分布比720r/min时更接近圆的分布。这是对一层薄膜模拟的结果,DWDM滤光片一般要镀(100~150)层膜,综合的效果将会使高速旋转下基片取得更好和更大面积的均匀性分布。

对其它参数的情况以及H膜料也可以进行同样的模拟分析。

2.3.2 转动机构多转过1/4圈的情况 实际工作中并不一定能够保证在镀膜的时间内转动机构刚好转整数圈。下面假设模拟转动机构在镀膜时间里,某一参考点最后并不停留在起始位置,而是多转过1/4圈的情况。

由所给出的模拟图可见,转动机构转过不是整数圈的时候均匀性分布发生了很大的变化,这表明起点位置的选取影响更大。尤其是在30r/min这样低速的情况下,不但是一个圆的分布,而且出现很大的反转,见图5,最大错位达到(15~17)mm左

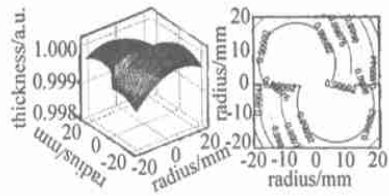


Fig. 5 Distribution of uniformity of L coating at 30r/min

右,这样的转速是不能用于镀制DWDM滤光片的。在高速的720r/min和1500r/min的情况下等值线分布比转整数圈时更表现出椭圆的形状。在相对厚度为0.99986的均匀性下,虚线圆在720r/min时半径为13mm,而在1500r/min时为13.2mm。相对低速而言,高速时的错位明显减少,见图6。从而表明在高速旋转的情况下可以更好的消除转动圈数上的差异,保证薄膜均匀性的稳定。

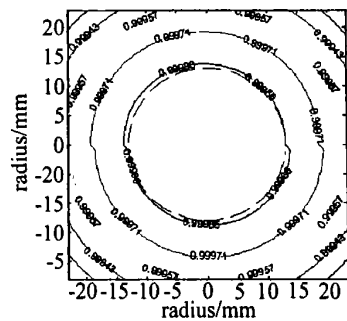


Fig. 6 Distribution of equal-value uniformity of L coating at 720r/min

同样,还可以对多转过半圈和3/4圈以及其它不是整数圈的情况来进行模拟,限于篇幅,图示不再列出。得到的结果均表明相同距离上不同点的均匀性是不同的,在低速的情况表现得很明显,在高速下则趋于圆的分布。由此可以解释为什么实际DWDM切片中等均匀性的切片并不是有规律的分布在同一个圆周上面。

综上所述,转速变化影响在整体上,而对某些确定的方向,转速几乎没有影响。高速转动机构对提

高均匀性分布以及获得更大面积的均匀性更为有利,在 DWDM 滤光片镀膜机中采用 1500r/min 或更高速的系统是必要的。

2.4 相同转速下不同的镀膜总时间引起的均匀性变化

还可以对取不同的镀膜总时间 T 的情况来进行模拟,结果发现镀膜时间对成膜均匀性也存在着影响。如果以刚好转过整数圈的情况考虑的话,镀膜时间因素的影响很小。仍以多转过 $1/4$ 圈的情况来进行模拟。如图 7、图 8 所示,镀膜时间分别 120s 和 180s。只针对低速的情况,高速的情况下时间的影响很小,这也证明必须采取高速机构来进行 DWDM 膜的镀制。可以看到薄膜均匀性在时间上是一个在平衡位置附近来回摆动的过程,并非一个稳态值。在镀膜时间加长的情况下,更能弥补不足

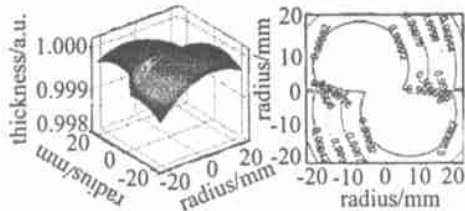


Fig. 7 Distribution of uniformity of L coating at 30r/min within 120s

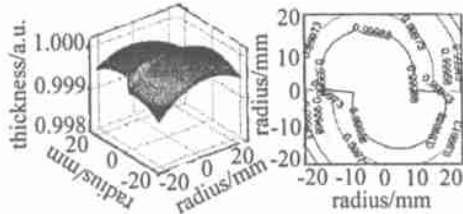


Fig. 8 Distribution of uniformity of L coating at 30r/min within 180s

整数圈时引起的整个基片上均匀性的误差。通过模拟可以知道薄膜均匀性在镀膜时间上的微小变化过程,而这些微小的变化对更密集的 DWDM 系统影响是明显的。

3 结 论

(1) 在镀膜过程中,不同的膜料引起的厚度均匀性不一样。针对 APS1104 机器结构,在文章给定的条件下,L 膜料的均匀性分布要好。膜料的不同会影响 DWDM 滤光片的成品率。

(2) 镀膜的过程中转盘的转速对均匀性影响较大。在文中的条件下,对 L 膜料的均匀性分布进行模拟,高速旋转下在更大的面积上取得更好的均匀性。多转 $1/4$ 圈的情况下,在基片的水平和垂直两个方向的边缘 ($r = 23\text{mm}$) 处,720r/min 的差别为 0.003%,1500r/min 的差别为 0.001%,从而以 1550nm 为参考波长的话,引起的波动分别为 0.0465nm 和 0.0155nm,这对 100G 的 DWDM 系统影响是很大的,而选取高速转动机构可以减少这种影响。

(3) 控制镀膜时间对成膜的均匀性有所影响。总镀膜时间不同可以得到不同的均匀性分布曲线。镀膜时间对低转速情况下成膜均匀性的影响更大。

参 考 文 献

(上接第 479 页)

- [6] Morozova Y P, Chaikovskaya O N, Artyukhov V Y *et al.* Soviet Journal of Chemical Physics, 1992, 9: 1176 ~ 1180.
- [7] 易平贵, 俞庆森, 胡新根 *et al.* 化学学报, 2000, 58(6): 652 ~ 655.
- [8] Grinter H C, Threlfall T L. UV-VIS spectroscopy and its applica-

- [1] 顾培夫. 薄膜技术. 杭州: 浙江大学出版社, 1990: 131 ~ 145.
- [2] 杨邦朝, 王文生. 薄膜物理与技术. 成都: 电子科技大学出版社, 1994: 25 ~ 35.
- [3] 阴晓俊, 费书国, 章月州 *et al.* 光学仪器, 2001, 12(23): 5 ~ 10.
- [4] 小泉达也, 孙大雄, 范 滨. 光学仪器, 2001, 12(23): 5 ~ 6.
- tions. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1992: 1 ~ 9.
- [9] Williams D H, Fleming I. Spectroscopic methods in organic chemistry. 5th ed, Berkshire: McGraw-Hill Publishing Company, 1989: 4 ~ 7.
- [10] 褚圣麟. 原子物理学. 北京: 高等教育出版社, 1996: 256 ~ 258.
- [11] 王庆文, 杨玉桓, 高鸿宾. 有机化学中的氢键问题. 天津: 天津大学出版社, 1993: 10 ~ 12.