文章编号: 1001-5078(2006)03-0199-04

一种用于镀制梯度反射率镜的遮蔽挡板的设计

高晓丹,张晓晖
(海军工程大学兵器工程系,湖北 武汉 430033)

摘 要:针对所设计的单横模 Nd:YAG激光谐振腔对梯度反射率镜径向膜厚分布的要求,介绍了一种用于镀制梯度反射率镜的遮蔽挡板的设计方法。从常规圆形孔径的遮蔽挡板来分析,比较了采用圆形孔径挡板所得的膜厚分布与设计要求的差别,建立了精确设计遮蔽挡板的数学模型,提出了设计遮蔽挡板的算法,并编程计算出具体的遮蔽挡板的孔径尺寸及安放位置,以获得完全合乎设计要求的变膜厚层沿半径方向的膜厚分布。

关键词:梯度反射率镜;遮蔽挡板;径向膜厚分布;激光谐振腔
中图分类号: O484.4 **文献标识码**: A

Mask Designing for Depositing Graded Reflectivity Mirror

GAO Xiao-dan, ZHANG Xiao-hui
(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: According to the requirement for film thickness profile along the radius in the graded reflectivity mirror, which is used in the designed single transverse Nd:YAG laser resonator, a designing method for mask is introduced, which is used for depositing graded reflectivity mirror. A special mask with circle aperture is analysed firstly, the film thickness profile by using circle aperture mask and the target profile is compared, and the mathematic model for accurately designing mask is built accordingly. The method for designing mask is put forward, and the aperture size and the position are computed by program. The film thickness profile along the radius of the varying layer is almost the same as the target profile by using it

Key words: graded reflectivity mirror; mask; film thickness profile along the radius; laser resonator

1 引 言

早在 30年前,国外就有理论提出采用反射率沿径向呈梯度分布的谐振腔腔镜可有效地消除硬锐边界腔镜的边缘衍射问题[1]。与均匀反射率镜(URM)谐振腔相比,以梯度反射率镜(GRM,也称变反射率镜)为输出镜的非稳定谐振腔以光滑的软边界腔镜代替了硬锐边界腔镜,可有效地消除边界衍射光的干扰,获得准几何近似的共振光场,大大改善共振光场的场强分布,提高腔的选模能力,增大基模体积,获得较高质量的激光光束[2-5]。梯度反射率镜之所以能沿径向改变反射率,主要是因为膜厚沿径向的改变,要改变膜层沿径向的厚度,则必须通过特定的遮蔽挡板来实现,而不同的激光器结构对谐振腔镜的梯度分布的要求也不同,因此,针对不同谐振腔对反射率分布的设计要求,各种相对应的遮蔽挡板的设计也成为镀制梯度反射率镜的关键因素。

2 梯度反射率镜膜系结构对遮蔽挡板的设计要求

针对我们所制作的 Nd:YAG固体激光器,为了获得单横模激光光束,谐振腔所要求梯度反射率镜的径向尺寸为 ϕ20mm,反射率沿半径方向的分布为

$$R(r) = 0.31\exp[-2(r/1.8)^{2.5}] \quad (1)$$

据此所设计的膜系结构为:

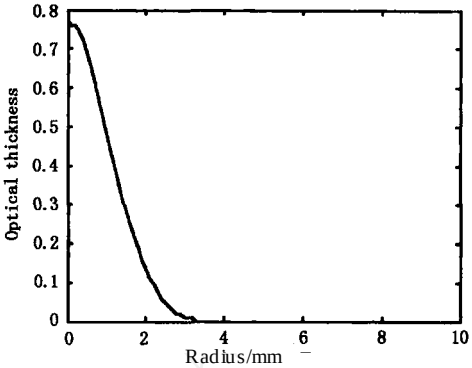
$$Substrate|(1.5293H\ 0.7709L)^{v}H|air。$$

其中,基片 *Substrate*选用 K9玻璃,折射率为 1.52,高折射率膜料 H的折射率为 1.95,低折射率膜料 L的折射率为 1.45, *air*的折射率为 1,参考波长为

作者简介:高晓丹(1980-),女,海军工程大学光电专业的在读硕士研究生,主要研究方向为光学薄膜技术。
E-mail: gxd_002@163.com
收稿日期: 2005-08-14

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1064nm, v为变膜厚层 H的光学厚度,它是一个沿径向改变的变量。在梯度反射率镜的镀制过程中,先不加遮蔽档板在基片上镀制增透膜系(1.5293H 0.7709L),再增加遮蔽挡板镀制变膜厚层 H。为了获得(1)式所示的反射镜沿径向的高斯反射率分布,在此膜系设计中要求变膜厚层 H沿基片半径方向的光学厚度(也即是 v的大小)的变化如图 1所示。为了在被镀基片上实现图 1中的径向膜厚分布,就有必要改变基片上的膜厚均匀性。在镀膜机内增加一块特殊的遮蔽挡板以实现膜系中变膜厚层沿基片径向的变化。



膜系中变膜厚层沿基片径向的光学厚度分布

Fig 1 the optical thickness of the varying layer along radius in the formula

一般情况下,遮蔽挡板是用来修正镀膜机内基片边缘的膜厚不均匀性,用以改善成膜的有效面积[6]。在这里则是要求在径向尺寸仅为 φ20mm的基片上精确实现图 1所示的径向膜厚分布。由图 1中曲线可见膜厚变化的范围非常窄,仅在基片上 0～3mm的径向范围内要求如此光滑细致的膜厚分布,而在变化范围以外,基片上膜厚全部为零。因此,相应的遮蔽挡板的设计就要求非常精确,大大增强其复杂程度。

3 镀制梯度反射率镜的遮蔽挡板的设计

3.1 建立设计遮蔽挡板的数学模型

对于旋转平面转盘镀膜机(如德国莱宝的 APS1104),在增加了遮蔽挡板后的膜层厚度分布随基片半径方向的变化可通过建立数学模型来求解。为便于分析,不失一般性,先假定遮蔽挡板为圆形孔径(如图 2所示),孔径的半径为 a,遮蔽挡板到基片的距离为 b,基片到蒸发源底板的距离为 h,蒸发源 S到底板中心(基片圆心在底板上的投影)的距离为 l。基片高速旋转,挡板固定不动。

在基片上以基片的旋转轴心 O'(也即是基片圆心)为坐标原点建立基片坐标系 $X'O'Y'$,在基片正下方距离基片高度为 b处的平面上建立挡板坐标系 XOY,其中 O为挡板孔径的圆心,也是基片圆心 O'在挡板平面上的投影。两坐标系具有完全相同的坐标方向。

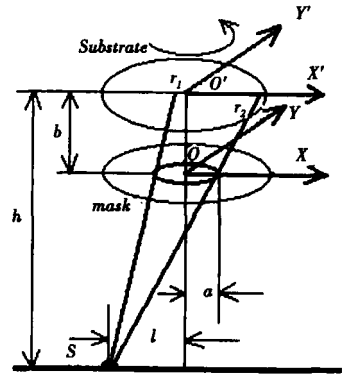


图 2 旋转平面转盘和挡板关系简图

Fig 2 the relation between rotate plate and mask

为便于对基片上的膜厚进行理论计算,假定膜料的蒸发满足如下条件:(1)工作室气压很低,足以保证蒸发物质的分子不受到剩余空气的碰撞而直接到达基底表面,且运动速度较小,迁移距离非常小;(2)蒸发物分子间的碰撞可忽略不计。

在膜料蒸发的过程中,由于遮蔽挡板的遮挡作用,蒸发源蒸发出的膜料分子只有能通过挡板孔径的一部分可淀积在基片上,在基片坐标系 $X'O'Y'$上,由于挡板的遮蔽作用以及基片的高速旋转,通过挡板开孔处的膜料在横坐标轴上有两个临界点(r_1, 0)和(r_2, 0)。由蒸发膜料发射特性的锥状对称性,穿过挡板孔径的膜料分子在基片上有一个成膜面积,该成膜面相当于挡板孔径在基片上的投影面。由简单的几何分析可知,膜料穿过挡板孔径在基片上的成膜面是挡板孔径的一个平移放大的像。令 G(r_0, 0)为 X横坐标轴上两临界点的中点,则基片上的成膜面相当于是以 $G(r_0, 0)$点为圆心,$(r_2 - r_0)$为半径的一个圆 G,其中

$$\begin{cases} r_1 = \dfrac{ah - bl}{h - b} \\ r_2 = \dfrac{ah + bl}{h - b} \\ r_0 = \dfrac{r_2 - r_1}{2} \end{cases} \qquad (2)$$

由于基片以基片圆心(也即基片坐标原点 O')为轴高速旋转,则在基片上距离基片圆心同一半径值的点具有相同的膜厚均匀性。在增加遮蔽挡板后,基片径向上半径为 r的一个圆(左圆 O')在旋转的某一时刻在成膜面(右圆 G)上的有效成膜范围

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(如图 3所示),基片上的每一点绕基片圆心作圆周运动,而在此时刻,某些背离成膜面的点会由于遮蔽挡板的遮挡作用而无法接受膜料的淀积 (如图 3中阴影部分所示),而只能在基片旋转的下一时刻,在成膜面 (圆 $G(r_0, 0)$)的有效范围内作圆弧运动接受膜料的淀积。这样,膜料淀积时间的不完全分布将会重新调整基片径向的膜厚均匀性。例如在距离基片圆心为 r的点,在蒸发过程中,基片绕圆心旋转,该点只能在成膜面的范围内以坐标原点为圆心, r为半径的弧段 BA上得到膜料的淀积。

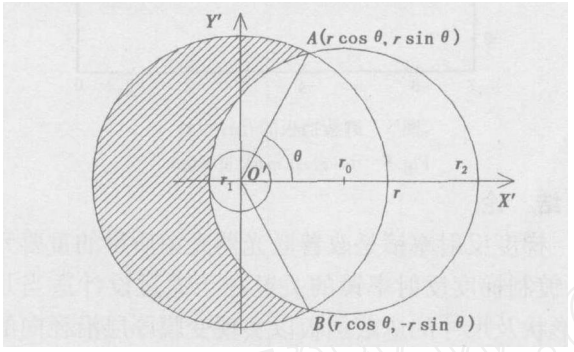


图 3 通过挡板孔径的膜料在基片上的膜厚分布简图

Fig 3 the diagram of the film thickness distribution on the substrate through mask

对于镀膜机自身的结构而言,在没有增加挡板时,基片径向上存在着一定的均匀性分布 $f(r)$[7]:

$$f(r) = \int_0^{\pi} \frac{v}{v_0}\,dt = \int_0^{\pi} \frac{(h^2 + l^2)^{(k+3)/2}}{(h^2 + l^2 + r^2 + 2lr\cos(\omega t))^{(k+3)/2}}\,dt \qquad (3)$$

式中各物理量的含义与文献 [7]中一致。在增加挡板后,挡板会对原先的径向膜厚均匀性分布重新调整。假设 A点到横轴的角度为 θ,则增加挡板后距离基片圆心为 r点的膜厚 $v(r)$为:

$$v(r) = \frac{2\theta}{2\pi} \times f(r) \qquad (4)$$

可见,从数学模型上来分析,在增加遮蔽挡板后,基片上的膜厚均匀性实质上是以坐标原点为圆心、不同半径的圆 O在成膜面圆 G内所占的弧段相对于整个圆周的比来修正镀膜机内基片的均匀性。对于基片坐标系 XOY上的圆 G和圆 O的交点 (x', y'),可列方程组:

$$\begin{cases} (x' - r_0)^2 + y'^2 = (r_2 - r_0)^2 & \text{圆 } G \\ x'^2 + y'^2 = r^2 & \text{圆 } O' \end{cases} \qquad (5)$$

求得:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{y'}{x'}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{r^2 - r_2^2 + 2r_2 r_0}{2rr_0}\right) \qquad (6)$$

因此,基片上的径向膜厚分布如下:

当 $0 \le r \le |r_1|$时, $\theta = \pi$基片上此范围内的膜厚分布为不加挡板时的膜厚分布,膜厚相对于中心的膜厚几乎为 1; (仅当 r_1为负值存在)

当 $|r_1| \le r < r_2$时, θ是一个从 π到 0的逐渐变小的函数,故膜厚的均匀性也在逐渐变小,从 1逐渐减小到 0;

当 $r \ge r_2$时,没有膜料的淀积,径向膜厚分布为 0。

3.2 遮蔽挡板设计方法的研究

采用圆形孔径挡板,使用全搜索法寻求最优的挡板孔径半径 a和距离基片高度 b,使基片上的膜厚分布与设计的膜厚分布的差异尽可能满足精度要求。结果发现,采用圆形孔径挡板设计的方法,所能搜索到的最优膜厚分布与理论设计的对比如图 4所示,其中曲线 1为变膜厚层沿径向的理论膜厚设计分布,曲线 2为所能搜索到的最优膜厚分布。对比两条膜厚分布曲线,膜系设计的膜厚分布曲线与采用圆形孔径挡板时的膜厚分布曲线存在较大的差异,满足不了膜系设计的精度要求,因此,不宜采用圆形孔径挡板。

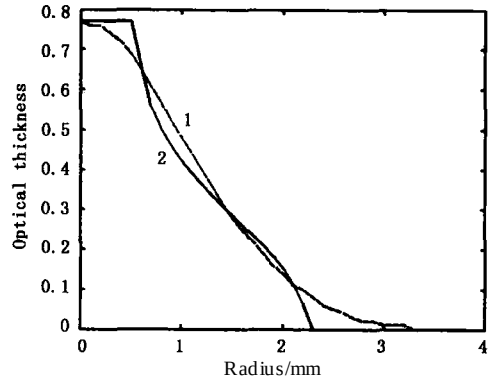


图 4 采用圆形孔径的最优膜厚分布与理论膜厚设计的对比

Fig 4 the contrast of target profile and optimal thickness profile with circle aperture

由膜系设计所要求的光学厚度分布来直接推导遮蔽挡板的孔径尺寸是获得精确膜厚分布的唯一选择。利用上述圆形孔径挡板建立的数学模型,可知,膜料穿过挡板孔径在基片表面上有一个成膜面,该成膜面相当于以蒸发源为光源发出的光通过挡板孔径在基片上的投影。由于蒸发源不在基片的正下方,使成膜面偏离基片中心并保持在同一位置不变,而基片绕中心轴高速旋转,在没有挡板时,基片沿径向存在一定的膜厚均匀性分布,在增加挡板后,由于挡板的遮挡作用,膜料只能淀积在成膜面上,基片上的某半径点在绕中心轴旋转的过程中,穿过成膜面上的旋转弧度占整圆周的比例来修正基片上该点的

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

成膜膜厚分布。

对于基片上半径为 r的点,由图 1已知该点所要求的膜厚为 $v(r)$,在没有挡板的条件下,基片径向的膜厚分布 $f(r)$由 (3)式可求,增加挡板后,根据计算式 (4),可推导出半径为 r的圆 O 在基片上的成膜面圆 G内所占的弧度的一半 $\theta(r)$,并且基片上的成膜面关于横坐标轴 X 对称。由 $\theta(r)$可求出基片上半径为 r的圆 O 与成膜面圆 G的交点,若 $\theta(r) > 0.5$,则表示交点位于基片坐标系 XOY的二、三象限;若 $\theta(r) < 0.5$,则表示交点位于基片坐标系 XOY的一、四象限;若 $\theta(r) = 0.5$,则表示交点位于基片坐标系 XOY的纵轴上。同理,对基片上任一半径的圆均可求出与成膜面圆的交点坐标,也即是成膜面的边界点坐标。连接所有的成膜面边界点,即可求出所要求的成膜面的边界范围,由投影关系,就可以通过成膜面的边界曲线求出遮蔽挡板的孔径边界曲线。

3.3 设计遮蔽挡板的计算机程序

用 MATLAB语言编制设计遮蔽挡板的程序,程序的运行步骤如下:

(1)对于基片上半径为 r的点,由增加挡板前后基片径向的膜厚分布 $f(r)$和 $v(r)$,根据计算式 (4),可推导出半径为 r的圆 O 在基片上的成膜面圆 G内所占的弧度的一半 $\theta(r)$,

$$\theta(r) = (v(r) \times \pi) / f(r) \tag{7}$$

(2)在基片坐标系 XOY上,位于一、二象限上的成膜面圆 G与基片上半径为 r的圆 O 的交点坐标 (x', y')可由下式求出:

$$\theta(r) \geq 0.5\text{时},\begin{cases} x' = -r\cos((1-\theta(r))\pi) \\ y' = r\sin((1-\theta(r))\pi) \end{cases} \tag{8}$$

$$\theta(r) < 0.5\text{时},\begin{cases} x' = r\cos(\theta(r)\pi) \\ y' = -r\sin(\theta(r)\pi) \end{cases} \tag{9}$$

(3)在挡板平面的坐标系 XOY上,对于某一个给定的挡板到基片的高度 b,对成膜面的边界坐标 (x', y'),由投影计算可相应求出位于一、二象限的挡板孔径的边界坐标 (x, y)。

(4)对基片上不同的半径 r,重复步骤 (1)、(2)和 (3),可求出一组离散的挡板孔径边界坐标,联立起来即为遮蔽挡板孔径边界的一半。由设计模型知挡板孔径关于挡板坐标系的横坐标轴对称,因此,遮蔽挡板孔径边界的离散坐标即可求出。

可见,随着遮蔽挡板距离基片的高度 b的改变,遮蔽挡板的孔径也会随之变化。由膜系设计的变膜厚层沿径向的膜厚分布要求来具体设计对应的遮蔽挡板,在距离基片 $b = 10$mm的坐标系 XOY上,遮蔽挡板的具体开孔尺寸及位置如图 5中封闭曲线所示。由此设计出的遮蔽挡板可使基片的膜厚分布曲线如图 1所示。

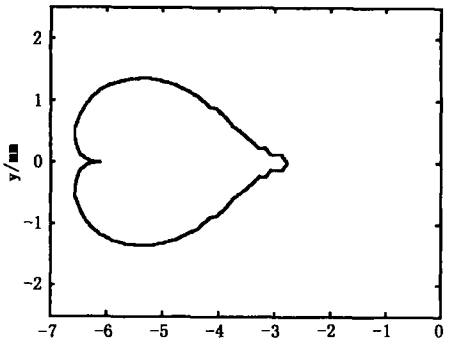


图 5 遮蔽挡板的孔径设计

Fig 5 designed mask aperture

4 结 论

梯度反射率镜是改善激光器光束质量的重要元件,镀制梯度反射率镜的关键在于通过设计适当几何形状及尺寸的遮蔽挡板以实现变膜厚层沿径向的光学厚度分布。文中所述的遮蔽挡板的设计方法带有普遍性,可以通过它设计出任意梯度反射率分布的遮蔽挡板。从膜系中变膜厚层沿径向的膜厚分布的设计要求出发来设计遮蔽挡板是获得理论膜厚分布的最佳途径。

参考文献:

[1] M Morin. Graded reflectivity mirror unstable laser resonators[J]. National Optics Institute, 1977, 29: 819 - 866.

[2] I P Nikolov, Buchvarov, L A Gubanova, et al. High power Nd:YAG laser with variable reflectivity mirrors[A]. Proceedings of SPIE, 2001, 4397: 49 - 53.

[3] Michael Gerber, Thomas Graf. Generation of super-Gaussian modes in Nd:YAG lasers with graded-phase mirrors[A]. Proceedings of SPIE, ALT'02 International Conference on Advanced Laser Technologies, 2003[C].

[4] M G Galushkin, V P Yakunin, V V Samarkin, et al. Investigation of beam quality of high power CO_2 laser with unstable resonator and variable reflectivity mirror[A]. SPIE, 1999, 3688: 48 - 53.

[5] Siamak Makki, James Leger. Mode shaping of a graded-reflectivity-mirror unstable resonator with an intra-cavity phase element[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2001, 37(1): 80 - 86.

[6] 林坚,林永钟,等. 光学薄膜厚度的修正挡板的设计[J]. 光子学报, 1999, 28(9).

[7] 唐晋发,顾培夫. 薄膜光学与技术[M]. 北京:机械工业出版社, 1989.

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net