

综合评述

供激光用的光学薄膜的特征

1. 概要

由多层介质膜构成的光学薄膜,在第二次世界大战以前,已开始研制潜望镜和瞄准器,天体望远镜等光学系统的增透膜。战后,随着真空蒸发涂膜技术的发展,光学薄膜已应用于民用照相机、眼镜镜片和干涉滤光片等。它们均采用波长范围宽的可见光波段涂膜。

另一方面,近年来,激光谐振腔以及光计测,光通信的各种器件用的光学薄膜,是属于紫外~红外波段中某一波长,或者,至多三种光波长的涂膜。计测和光通信用的光学薄膜,要求具有高反射率(或高透过率)和高消光比。激光谐振腔用的薄膜,除光学特性的要求之外,耐激光损伤特性也十分重要。

因而,光学薄膜的特性,很多情况下会左右系统整体的参数。

本文主要介绍在光计测和光通信的光学系统中十分重要的偏振光分束器等用的光学薄膜以及高功率 YAG 激光器用的光学薄膜。

2. 光计测和光通信用的光学薄膜

2.1 偏振光分束器(PBS)

偏振光分束器,入射的激光在反射面内

存在平行的电分量(S 偏振光),而与 S 偏振光相垂直的分量(P 偏振光)被选择地透过,由此构成偏振光分离光学元件(图 1)。

Macheille 型(立方型)偏振光分束器,是将涂有多层介质膜的二个直角棱镜用斜面粘接在一起制成的。因而,与平板型偏振光分束器相比,透射光的光轴偏离小,而且可获得高消光比。

多层介质膜偏振光分束器与普通光学薄膜一样,是用 TiO_2 、 ZnS 、 ZrO_2 等高折射率材料与 MgF_2 、 SiO_2 等低折射率材料组合制成。

用较少层数的介质膜使对 S 偏振光分量反射时,如果薄膜的折射率差比较大,引起 P 偏振光分量透射波长变动。相反,将折射率差减小时, P 偏振光分量透过波长的变动受到抑制;为提高 S 偏振光分量的反射率,介质膜总层数要在 30 层以上。实际上,膜的应力弛豫也要考虑,设计成部分地将膜厚错开 $\lambda/4$ 的总层数约为 15 层的膜。

典型的 633 nm 用偏振光分束器的透射率波长特性示于图 2,消光比(P 波透过光量 T_P / S 波透射光量 T_S)与入射角的关系示于图

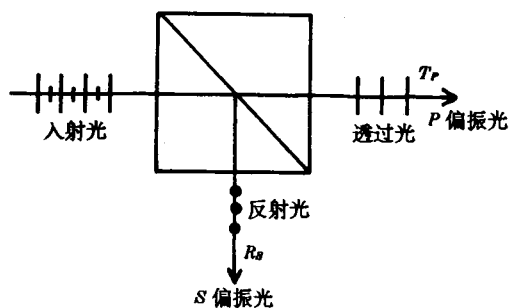


图1 偏振光分束器

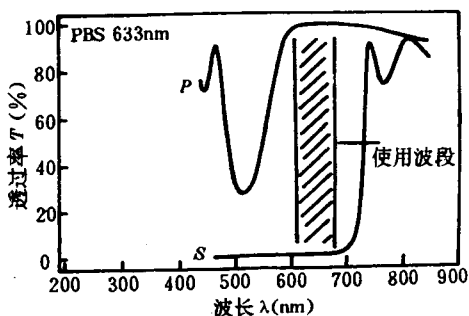


图2 633 nm 用偏振光分束器的透射率波长特性

3. 与普通光学薄膜元件相同, 偏振光分束器性能与入射角强烈相关。但是, 为避开来自增透膜少量的剩余反射光, 需保留一点入射角度。正如图3所示, 在此种情形下, 器件如处于以既垂直入射光轴又垂直反射光轴的轴为中心 $\pm 5^\circ$ 以内, 消光比便可保持不变。

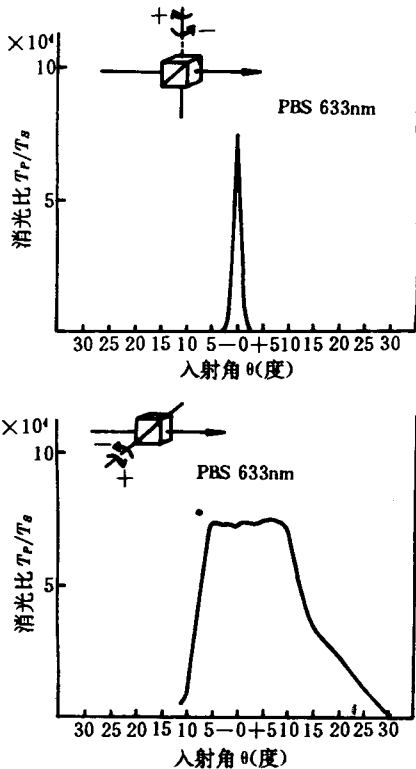


图3 633 nm 用偏振光分束器的消光比与入射角关系

2.2 非偏振光分束器(NPBS)

非偏振光分束器是一种与入射激光偏振特性无关, 将光量按 1:1 向二个方向分离的

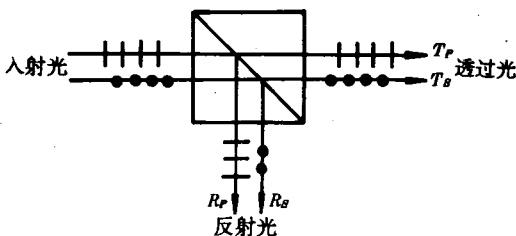


图4 非偏振光分束器

元件(图4)。非偏振光分束器的膜层由多层介质膜与金属膜层迭合而成。这是因为只用多层介质膜, 虽然可获得 50% 的反射率, 但 P 偏振光分量的反射率以及反射带宽, 与 S 偏振光分量相比要小。附加金属膜可弥补上述的不足。但金属膜将产生 6~8% 的吸收。

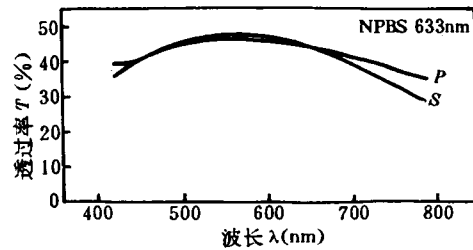


图5 633 nm 用非偏振光分束器的透射率波长特性

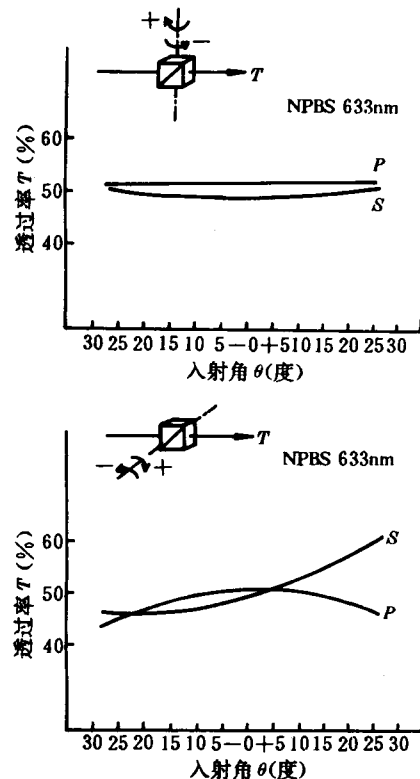


图6 633 nm 用非偏振光分束器的透射率与入射角关系

典型的 633 nm 用非偏振光分束器的波

长特性示于图5,与入射角的依赖关系示于图6。与偏振光分束器相比,非偏振光分束器的透射率与入射角的关系较小。另外,以入射光为基准的相位差示于图7。入射光通过多层介质膜被分离成透射光和反射光。此时,入射光与透射光、反射光之间存在相位差。由多层膜引起的相位差这部分,可通过膜的设计加以修正。但是,还存在粘接剂部分的畸变影响,使整个相位差为零十分困难。

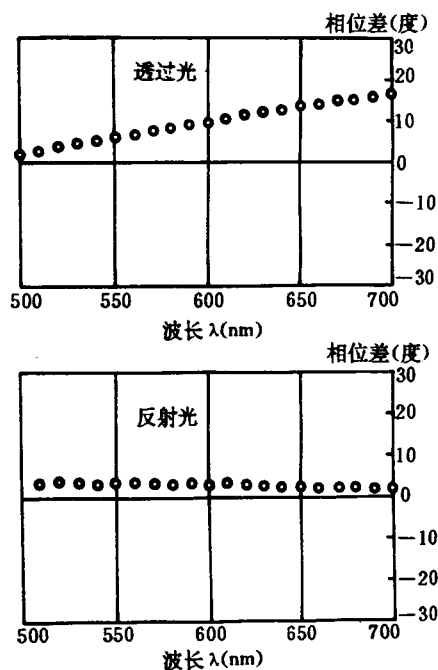


图7 633 nm 用非偏振光分束器相对入射光的相位差特性

2.3 分束器

分束器是在平行平面基板上两面交替层迭由多层介质膜和金属膜组成的反射膜和半反透膜,当激光斜入射时,使一束光分裂成多束光的元件。除单色光的光量分割型之外,还有将多波长的多色光实行波长分割,并且按各种波长进行光量分割的类型。

图8以多波长型为例,给出对应红绿蓝光的分束器结构。含有红绿蓝三种波长的激光,首先经分色镜3分离成红光(透射)和绿

蓝光(反射),进而,绿蓝光又经分色镜4分离成绿光(透射)和蓝光(反射)。其后,红绿蓝光经各自的半透镜和基板内之字形光路,各按光量分离成5束光。

为抑制由于光束重叠而产生散斑,应适当设定光束直径和光束间距。图8例中,光束直径为0.8 mm,光束间距为1.5 mm,入射光容许范围在 $\pm 0.5^\circ$ 之间。另外,随着之字型光路的反射次数增多,膜界面和膜表面散射的影响随之增大,因此优化和控制成膜条件十分重要。

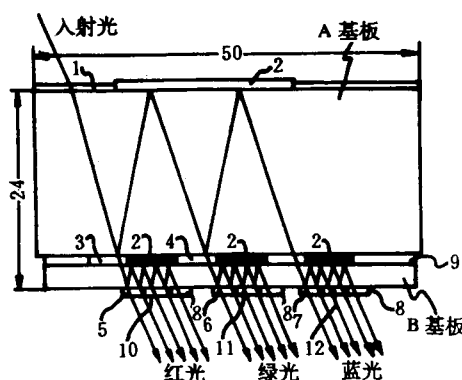


图8 红绿蓝光用分束器

1—增透膜;2—高反膜;3—632.8 nm 分色镜;4—543.5 nm 分色镜;5—632.8 nm 半透镜;6—543.5 nm 半透镜;7—457.9 nm 半透镜;8—增透膜;9—粘接层;10—632.8 nm 半透镜;11—543.5 nm 半透镜;12—457.9 nm 半透镜

3. 高功率激光用光学薄膜

实用化高功率加工用的激光装置有准分子激光器和YAG激光器等。用于上述装置的光学薄膜,尤其存在耐激光损伤性能之问题。为提高多层介质膜激光损伤阈值,必须尽可能减小基板表面的粗糙度^[1~3],膜的微小吸收^[4,5],膜内电场强度^[6~9]等三个因素。

基板表面粗糙度与基板表面损伤阈值之间的关系为:

$$E \propto 1/\sqrt{\sigma}$$

$$D_a = E^2 \propto 1/\sigma$$

E : 基板表面电场强度 (MV/cm)

D_a : 基板表面损伤阈值 (J/cm^2)

σ : 表面粗糙度 (nm)

可见, 介质膜损伤阈值与基板表面粗糙度成反比例关系。因而, 必须尽可能减小表面粗糙度。对高损伤阈值用基板, 要求 $\sigma < 0.5 \sim 0.6$ nm 均方根值 (3 nm p-v)。

介质膜吸收也是使损伤阈值降低的重要原因。膜的吸收很小, 吸收系数在 $10^{-4} \sim 10^{-6} cm^{-1}$, 用分光光度计无法测量。通常, 与高折射率膜相比, 低折射率膜的吸收量较小, 损伤阈值高。高折射率材料中, ZrO_2 和 Ta_2O_5 的吸收小, 其次是 TiO_2 。但是, 与蒸发涂膜条件强烈相关, 因而, 相对各种材料, 必须将诸如基板温度、氧分压、涂膜速度等涂膜条件最佳化。另外, 晶体结构、晶粒度、填充密度、界面状态等也发生变化, 其结果, 这些因素也左右损伤阈值。此外, 除膜的吸收之外, 膜的导热率也影响损伤阈值。实际上, 选择什么材料, 以什么蒸发涂膜条件成膜, 除了考虑损伤阈值之外, 还要综合考虑诸如膜的折射率、附

着性、机械强度、激光脉冲宽度和重复频率等参数而加以确定。

当膜内电场强度 (入射光电场在膜内形成的驻波大小) 较大时, 电场强度成为损伤发生的主要原因。对高反射膜等多层介质膜, 应以降低电场强度为目标, 根据入射激光条件进行膜层设计。

以上, 就左右损伤阈值的三方面作了介绍。实际制作中, 从基板研磨到膜的清洗、成膜等各道工序中对沾污的控制也十分重要。例如, 研磨剂用过渡族金属氧化物材料, 基板清洗在半导体级无尘清洁室中精密清洗, 防止成膜装置扩散泵的反油等。

以下就 $1.06 \mu m$ 的 YAG 激光器用光学薄膜以及作为可获得高亮度光束的高斯谐振腔用输出镜所必须的高斯镜加以介绍。

3.1 高功率 Nd:YAG 激光器用光学薄膜

激光系统中使用的光学薄膜和高功率 YAG 激光器用光学薄膜制品的参数列于表 1。

表 1 高功率激光器用的光学薄膜的特性与用途

品 名	波 长 (nm)	入射角 (度)	反射率/透射率 R/T (%)	激光损伤阈值 (J/cm^2) [*]	用 途
高反射膜	1064	0	$R > 99.7$	30	谐振腔后反射镜
		45	$R > 99.5$	30	加工用扫描反射镜
增透膜	1064	0	$R < 0.2$	15	窗口、聚光透镜、谐振腔输出镜的背面, 激光基质
偏振膜	1064	56.5	$T_P > 96, T_S < 1.0$	15	隔离器用, 衰减器用, Q 开关用
	1054	56.5	$T_P > 96, T_S < 1.0$	15	

增透膜, 以往在照相机以及眼镜镜片中应用, 要求透过波长波段宽和显色指数 (CCI) 最佳, 对于各种玻璃材料, 设计各种结构的多层膜并进行实验。而激光用的增透膜, 除振荡波长之外, 还需重点研究在二倍频波和三倍频波处的最小反射率和耐激光损伤特性。

单一波长时, ν 涂膜比较适用。

由于 带宽窄、可获得最低反射率以及基

本上是由二层非 $\lambda/4$ 膜组成, 因而膜层不易损伤。另外, 为提高损伤阈值, 采用 SiO_2 等的低折射率材料的底膜是很有效的。这是因为, 增透膜的激光损伤, 主要原因是基板与膜层的界面处存在的杂质等引起的微小吸收。引起微小吸收的物质, 被认为是除了洗净后基板表面的残留物之外, 还有相对于基板的第一层高折射率材料 TiO_{2-x} 和 ZrO_{2-x} 等的氧

缺陷型的非化学计量比性氧化物。膜内电场强度,由于在膜结构上不能建立大的驻波,而不构成损伤的主要原因。

高反射膜时,降低膜界面处的电场强度,是提高损伤阈值的关键。总层数为15层的高反射膜膜内电场强度示于图9。入射光在膜界面处重复反射和透射,直至第5层大部分被反射。QW(四分之一波)型处,第15~14层,13~12层,⋯的膜界面,产生峰值,越接近光入射面越大。因而,采用将电场强度峰值位置从膜界面向损伤阈值高的低折射率层漂移的膜结构[NQW(非四分之一波)型]。NQW型,将处于第15~14层膜界面处的最大峰值漂移至低折射率层第14层。另外,尽管第15层不受电场强度的影响,但在第15层之上附加涂以 SiO_2 等膜厚 $\lambda/2$ 的覆盖膜对提高耐损伤特性也很有效。

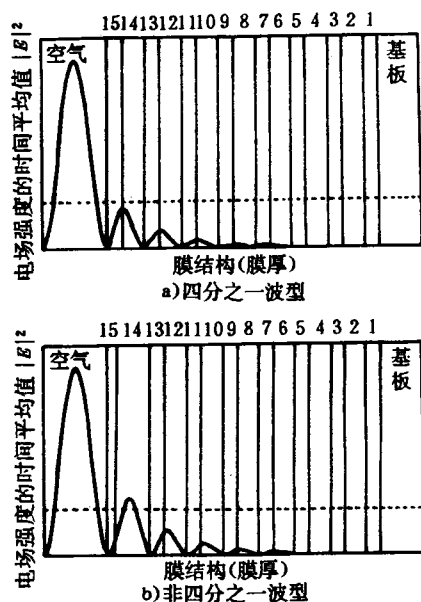


图9 高反射膜的膜内电场强度分布
(a) 四分之一波型; (b) 非四分之一波型

利用多层介质膜的起偏器,有将2个直角棱镜粘接在一起的Macneille型偏振光分束器。该种偏振光分束器,可获得37~40 dB以上的高消光比,在光通信、光计测等领域得

到应用(参照2.1)。但是,由于采用粘接剂,损伤阈值降低,连续光 100 W/cm^2 ,脉冲光 1 MW/cm^2 ,无法在高功率激光中使用。设置空气层以取代粘接剂,其损伤阈值也不过 500 MW/cm^2 左右。而且,其大小限制在2英寸以下。因此,为能在高功率激光器中应用,采用比Macneille型偏振光分束器损伤阈值高,尺寸可以比较大的平行平面基板薄膜平面起偏器(TFPP)。该种薄膜平面起偏器,对于P、S偏振光,其光谱特性和膜内电场强度具有相反的关系,因而,一般注重高耐损伤特性,设计时取电场强度优先的膜结构(图10)。结果,其消光比比Macneille型偏振光分束器低。另外,其P偏振光透过带较窄,因而其膜厚精度控制在1%以下。

以上,就高功率Nd:YAG激光器用光

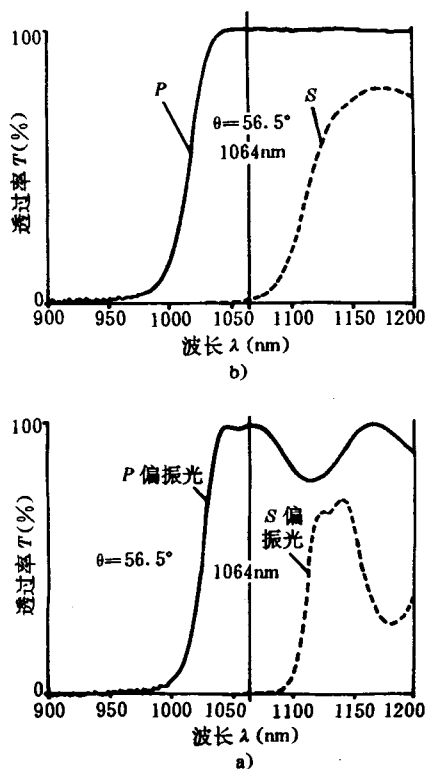


图10 薄膜平面起偏器的光谱特性

- (a) 以电场强度优先的膜设计;
(b) 以光谱特性优先的膜设计

学薄膜作了介绍。最近,作为半导体激光泵浦 YAG 激光器用,光学薄膜需要耐激光损伤的反射率 $R > 99.9\%$ 的高反射膜和透过率 $T > 99.9\%$ 增透膜。对此,需要离子束溅射等超低散射膜的成膜技术和基板的超平滑研磨技术。

3.2 YAG 激光用高斯镜

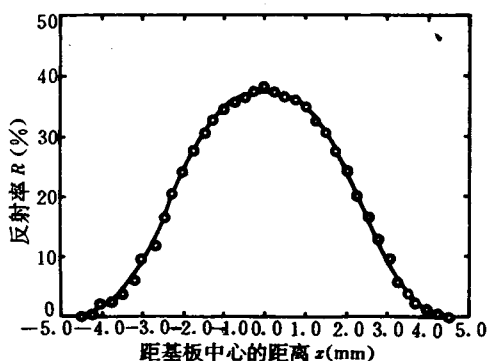


图 11 高斯镜的反射率分布一例。

最大反射率 $R_0 = 37.3\%$ ；光斑直径 $W = 3.4$ mm；超高斯因子 $n = 2.9$ ；波长 $\lambda = 1064$ nm

在基板半径方向上具有反射率分布的多层介质膜镜,其反射率分布,以高斯函数或超高斯函数(式 1)表示。图 11 为 $n = 2.9$, $W = 3.4$ mm, $R_0 = 37.3\%$ 的反射率分布的高斯镜的一个例子。

$$R(x) = R_0 \exp[-n^2(x/W)^2] \quad (1)$$

x : 离基板中心的距离

W : 光斑直径

n : 超高斯因子

R_0 : 最大反射率

在有多层介质膜的层内制成某种膜厚分布,即得到反射率分布。反射率分布 $R(x)$,是相对于膜厚 d 的反射率变化 $r(d)$ 和相对基板半径方向上膜厚分布 $d(x)$ 的函数,用下式表示:

$$R(x) = r(d(x))$$

膜的结构,比如说,在基板上的增透膜中附加高折射率层 H ,即:

基板 / 增透膜 / $k \cdot H$ $k = 0 \sim 1$

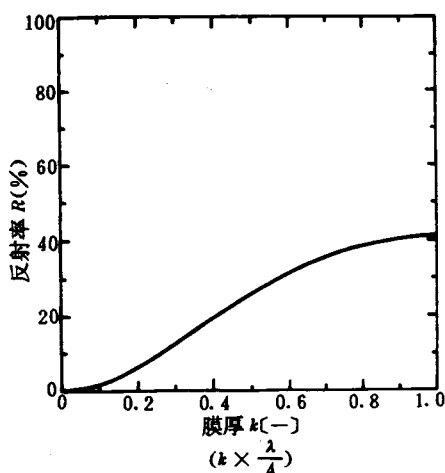


图 12 相对膜厚的反射率变化。

膜结构: 基板/增透膜 / $k \cdot H$; 基板折射率 $n_g = 1.507$;
高折射率层的折射率 $n_H = 2.15$; 波长 $\lambda = 1.64$ nm

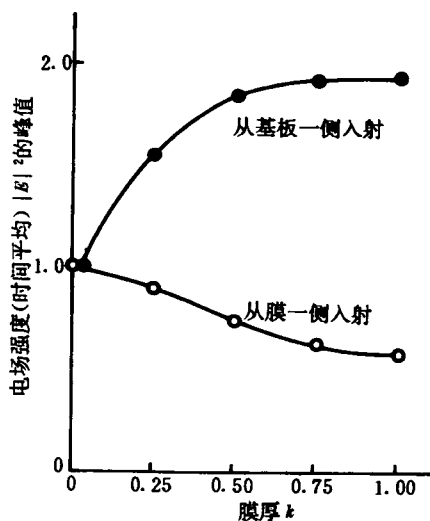


图 13 电场强度峰值与膜厚的关系

(H 代表光学膜厚为 $\lambda/4$ 的高折射率层。 k 为 H 的系数, $k=1$ 时,光学膜厚为 $\lambda/4$ 。)将最上层 H 的膜厚制成某种面内分布,使反射率具有某种分布。图 12 为相对于 H 膜厚的反射率变化的计算值。 H 层的膜厚, $k=1$ 时,为最大反射率 41%, $k=0$ 时,为 0%。实际上,可以在 $n = 2.2 \sim 11.0$, $W = 0.75 \sim 3.4$ mm, $R_0 = 0 \sim 40\%$ 的范围内控制反射率分布。另

外,电场强度也随膜厚的变化而变化(图13)。损伤阈值,相对于脉冲宽度为10 ns时,为15~30 J/cm²。

表2 高斯腔镜与普通腔镜的比较
(Q开关脉冲YAG激光器)

	输出能量	M^2	B
VRM(高斯腔镜)	250mJ(8ns)	<2.5	442TW/cm ² sr
普通非稳腔	230mJ(8ns)	4.9	106TW/cm ² sr

$$\text{亮度 } B = \text{功率} / (\pi \theta W_0)^2 = \text{功率} / (M^2 \lambda)^2$$

以前,为使激光器以单横模振荡,在谐振腔中放入光阑进行选模。但是,该方法无法得到很大的模体积,因而不能有效地达到高功率输出。另外,采用普通腔镜的非稳腔,虽然可能获得高功率,但存在成为多模输出的缺

点。

相反,采用高斯镜作为输出镜,可高效获得高质量光束(低阶模且无噪声的空间轮廓)。并且可实现高亮度输出。 M^2 因子(等于束腰尺寸,为理论衍射极限光束(TEM₀₀)与实际光束发散角的比。 $M^2 = 1$,意味着只存在TEM₀₀光束)小,且成为高亮度光束,聚光性非常好(表2)。因而高斯谐振腔,在打孔和切割等加工用以及绿光、紫外光等的倍频发生用高亮度YAG激光器中应用十分有效。在脉冲激光器中,用峰值反射率为15~50%的腔镜,而在连续激光器中,则使用峰值反射率为90%的高斯腔镜也十分有效。

(邹意会;张荣康供稿)

激光消融与光化学蒸气沉积

1. 引言

最近激光消融和光化学蒸气沉积作为生产各种薄膜的可能沉积法而受到重视。

在激光消融中,强脉冲激光束将固体靶表面气化,并在真空室内沉积到基片上成为薄膜。激光消融的原始概念,在1960年激光问世不久就想到了^[1]。此后进行了一系列工作,但激光消融变得像现在这样热门,是在1987年将其成功地用于高温超导薄膜生产之后才形成的^[2]。激光消融的其他方面应用,包括制备各种薄膜陶瓷^[3]、类金刚石薄膜^[4~6]和最近的C₆₀薄膜^[7]。

同时,在光化学蒸气沉积中,光的作用是在反应室中,将源气体感生一种化学反应^[8,9]。最初观察到辐照效应是在1968年,由Nishizawa用金属氧化物化学蒸气沉积外延生产GaAs时发现的^[10]。他的小组发现,用低压汞灯发出的紫外光辐照改善了沉积物的形态。经漫长的停顿之后,在1978至1979年,

用激光做光源,将光用于薄膜沉积的思想又重新提出。这次立即引起人们的极大关注,因为有可能不用任何掩模,采用化学反应法就可以生产花样薄膜。这种化学反应仅发生在用聚焦激光束辐照的一块微小面积上^[9]。此外,用紫外光通过将源气体光分解,有可能进行低温沉积。

两种光沉积法看上去不同,一个是物理方法,另一个是化学方法。可是它们都用光作为沉积必需的能源。由于我们的目的在于激光应用,因此,对两种方法都感兴趣。

2. 薄膜的光感生沉积

沉积薄膜需要某种形式的能量。在真空中蒸发和化学蒸气沉积,能量可用热的形式提供;而溅射沉积需要的能量则是离子的动能。在薄膜的光感生沉积中,由光子提供沉积所需的能量。

在激光消融中,用脉冲激光器(例如Q开关Nd:YAG激光器和准分子激光器)辐照