

激光与光电子学进展

离子束辅助电子束蒸镀 H4 膜工艺及其抗激光损伤特性研究

李晓雪¹, 黄玲程², 郝永芹^{1*}¹长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022;²北京雷生强式科技有限责任公司, 北京 100015

摘要 采用等离子体辅助电子束镀膜法制备了钛酸镧(H4)薄膜,研究了基底温度和离子束流密度等工艺条件及高温退火和等离子体后处理技术对H4薄膜的光学特性和表面形貌的影响。实验发现,适当地提高基底温度和离子束流密度可以提高薄膜折射率和薄膜质量。在基底温度为175℃,离子束流密度为120 μA/cm²时,薄膜折射率最高为2.70,且退火和等离子体后处理技术可进一步使薄膜质量得到改善。将优化的工艺参数用于980 nm高反射膜的镀制,并与采用Ta₂O₅、TiO₂作为高反射率材料的高反膜进行了比较,在600 MW/cm²的激光作用下,H4高反膜系的抗激光损伤特性最优。

关键词 薄膜; 离子束辅助电子束镀膜; 钛酸镧(H4); 腔面膜; 折射率

中图分类号 TN205;O484

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1931001

Preparing H4 Films and Their Laser Damage Resistance Deposited Using Ion-Beam-Assisted Electron Beam Evaporation

Li Xiaoxue¹, Huang Lingcheng², Hao Yongqin^{1*}¹State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;²Beijing Opto-Electronics Technology Co., Ltd., Beijing 100015, China

Abstract LaTiO₃ (H4) films were prepared using ion-beam-assisted electron beam evaporation. The effect of substrate temperature, ion-beam density, high-temperature annealing, and plasma post-treatment on the optical properties and surface topography of the H4 films were tested. Results show that increasing the substrate temperature and ion-beam density appropriately can improve the refractive index and film quality. Under 175 °C substrate temperature and 120 μA/cm² ion-beam density, the refractive index of the H4 films can reach 2.70. Moreover, annealing and plasma post-treatment can further improve the film quality. The optimized process parameters were used to prepare high reflection (HR) films with H4 for a 980-nm laser diode. The HR films with H4 exhibit the best laser damage resistance under 600 MW/cm² laser power density when compared with the HR films made with Ta₂O₅ or TiO₂ as high-index materials.

Key words films; ion-beam-assisted electron beam evaporation; LaTiO₃ (H4); facet coating; refractive index

1 引言

半导体激光器由于其体积小、质量轻、波长覆盖范围广、阈值电流低、电光转换效率高、寿命长等优点被广泛应用于光电子、材料加工、航空、医疗卫生等领域中^[1]。腔面膜技术是半导体激光器制备中最核心的技术之一。灾变性光学腔面损伤是限制激光器最大输出

功率的重要因素,它是一个不可逆转的光学破坏现象^[2-3],但通过对激光器腔面的镀膜工艺和后工艺处理技术的研究^[4-6],可以提高器件的抗光学灾变损伤(COD)能力,进而提高激光器的输出功率和电光转换效率,同时腔面膜还能起到保护激光器腔面的作用,隔绝环境中的灰尘和水气等,使腔面成分不易随外界条件发生变化,提高器件的稳定性^[4]。腔面膜对器件的

收稿日期: 2021-08-02; 修回日期: 2021-09-11; 录用日期: 2021-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(11474038)、吉林省科技发展计划项目(20200401073GX)

通信作者: hyq72081220@aliyun.com

COD水平以及可靠性都有重要影响,进而大大提高激光器的使用寿命。

半导体激光器常见的高反膜系有 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 、 $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ 等,研究人员不断地对这些膜系及其制备技术进行优化,以获得更好的腔面抗损伤特性。钛酸镧(H4)是德国 Merck 公司开发的一种高折射率低吸收镀膜靶材,是把两种激光损伤阈值较高的材料氧化钛(TiO_2)和氧化镧(La_2O_3)按照物质的量的比例为 2:1 进行混合、造粒、烧结,得到最终 LaTiO_3 (H4) 镀膜材料,其透明区为 400~7000 nm,折射率为 2.05~2.15,熔点为 1800 °C,蒸发速率控制在 0.2~0.4 nm/s^[7]。该膜料光学性能稳定,不易与其他物质发生反应,容易蒸镀而且吸收很小。但目前对 H4 薄膜的研究尚处于实验探索阶段。近年来,学者们研究了 H4 薄膜的制备工艺对薄膜的光学性能和激光损伤特性的影响,发现制备薄膜时的基底温度对薄膜的性能影响最大,随着温度的升高,光学薄膜的折射率逐渐增大^[8-10]。蒸发束流和真空度也会影响薄膜的光学性能,通氧量对薄膜性能的影响最小。制备工艺影响薄膜的光学性能,进而直接影响薄膜的抗激光损伤特性^[11-13],所以对 H4 薄膜的稳定制备工艺研究尤为重要。本文在研究 H4 单层膜的光学特性和表面形貌的基础上,采用 H4 作为高折射率材料与 SiO_2 组合成高反膜系,并将其与 $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 膜系的抗激光损伤能力进行了比较。

2 H4 薄膜的制备及结果分析

2.1 实验过程

实验中的镀膜设备为德国 Leybold 公司生产的 ARES710 型电子束真空镀膜机,实验基底全部选用厚度 1 mm、直径 2.5 cm 的同一批次的 K9 玻璃,镀膜材料为德国 Merck 公司的 H4。镀膜前用丙酮清洁基片,氮气烘干后装入真空室,真空度为 2×10^{-3} Pa,氧气流量为 4.97×10^{-7} m³/s,镀制膜厚 200 nm,沉积速率为 0.2 nm/s。实验中通过改变基底温度、离子束流密度、退火温度及等离子体后处理时间等研究各工艺参量对薄膜的光学特性及薄膜质量的影响。

2.2 结果与讨论

图 1 为采用美国 J. A. Woollam 公司的椭偏仪测量的不同基底温度下制备的 H4 薄膜折射率曲线。薄膜的色散关系用柯西模型来表示:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}, \quad (1)$$

$$k(\lambda) = \delta \exp \left\{ \beta \left[12400 \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\gamma} \right) \right] \right\}, \quad (2)$$

式中: A 、 B 、 C 为柯西色散系数; λ 为波长; δ 为消光系数幅值; β 为指数系数; γ 为带隙边。以上参数均为拟合参数。依照柯西模型对膜片的光学常数进行拟合,从

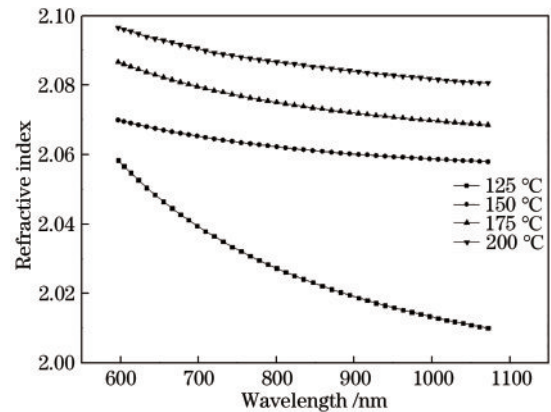


图 1 不同基底温度下的 H4 薄膜的折射率变化曲线
Fig. 1 Refractive index curves of H4 films at different substrate temperatures

图中可以看出, H4 薄膜的折射率表现为长波低短波高的正常色散关系。在 125 °C 时, 薄膜的折射率较低, 且向长波方向明显下降, 说明此时的薄膜缺陷较多, 而基底温度较低, 膜层原子未能获得足够的能量对膜层结构进行重新排列, 薄膜致密性较差, 以使薄膜对光的折射率变化较大, 在 980 nm 处, $n=2.014$ 。薄膜的折射率随着基底温度的升高而增大, 且当温度高于 150 °C 时, 折射率随温度的增长缓慢, 折射率随波长的变化不明显。此结果表明, 较高的基底温度有利于获得更致密稳定的 H4 薄膜。基底温度是影响光学薄膜质量的重要因素, 基片表面粒子的迁移率会随基底温度的变化而变化, 进而导致薄膜密度变大或变小, 引起折射率和消光系数的变化。随着基底温度的升高, 膜料原子得到额外的能量补充, 在玻璃片上的迁移率就会变大, 薄膜的凝聚系数和聚集密度也会受到影响而变大, 致密度的增加使薄膜的折射率变大。当基底温度继续升高时, 材料原子在一定温度后已经基本完成膜层结构重构, 温度再增加, 已经不能再明显提高薄膜的致密性, 所以在 175 °C 后, 折射率增长缓慢。在其他工艺条件不变的条件下, 超过一定临界温度后, 基底温度对薄膜的折射率影响不大, 而这个临界温度由具体的设备工艺条件决定。图 2 为不同基底温度下原子力显微镜 (AFM) 测得的 H4 薄膜样品表面形貌图, 表 1 所列为图 2 样品的表面粗糙度值, 其中 R_a 为薄膜样品表面粗糙度, R_q 为均方根粗糙度。在光学薄膜制备过程中, 薄膜表面发生的光散射大小与薄膜表面粗糙度有关, 散射 T_{is} 与均方根粗糙度 σ 的关系表示为

$$T_{is} = 1 - \frac{R}{R_0} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda} \right)^2 \right] \approx \left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda} \right)^2, \quad (3)$$

式中: R_0 是理想光滑表面反射率; R 是实际表面反射率。表面粗糙度越低, 散射就越少, 由此产生的热损耗也会降低, 进而有益于提高薄膜的抗激光损伤能力。从图 2 和表 1 可以看出, 适当增加基底温度有利于获得结构致密光滑的高质量薄膜, 但过度增加基底温度会

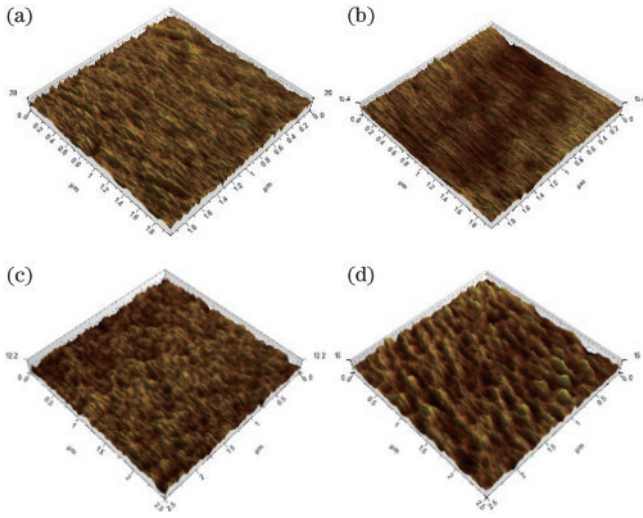


图 2 不同基底温度条件下的 H4 薄膜样品表面形貌的 AFM 图。
(a) 125 °C; (b) 150 °C; (c) 175 °C; (d) 200 °C
Fig. 2 Atomic force microscope (AFM) images of surface morphology of H4 films at different substrate temperatures.
(a) 125 °C; (b) 150 °C; (c) 175 °C; (d) 200 °C

表 1 不同基底温度下的 H4 薄膜样品表面的粗糙度

Table 1 Surface roughnesses of H4 films at different substrate temperatures

$T / ^\circ\text{C}$	R_a / nm	R_q / nm
125	0.505	0.649
150	0.450	0.574
175	0.421	0.522
200	0.431	0.565

导致薄膜表面的粗糙度升高。随着温度的持续增加,薄膜原子的晶粒尺寸会随之变大,导致薄膜表面粗糙度增加^[14-15],进而增加表面散射,增大热损耗。所以综合考虑,基底温度不宜过高。

通常电子束蒸发镀膜法所得到的薄膜结构松散,表面表现为柱状结构,为了弥补电子束蒸发的缺陷,采用离子辅助蒸镀电子束镀膜,此方法可以增加膜基结合力,使膜层更加致密。图 3 为不同离子束流密度下的

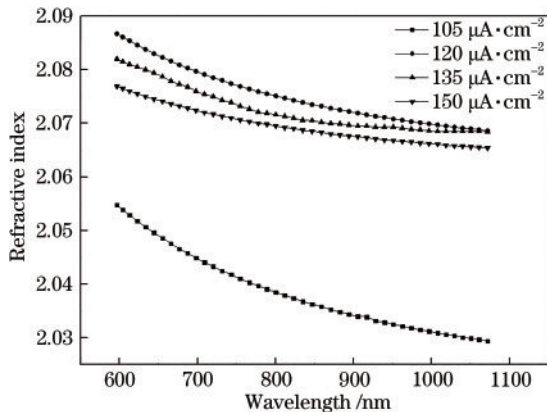


图 3 不同离子束流密度下的 H4 薄膜的折射率变化曲线
Fig. 3 Refractive index curves of H4 films at different ion-beam densities

H4 薄膜的折射率曲线。实验过程中离子源的电压始终为 150 V,通过改变离子源电流来改变离子束流密度,基底温度为 175 °C。当离子束流密度为 105 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时,H4 薄膜在 980 nm 处的折射率 $n=2.032$ 。当离子束流密度增加到 120 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时,薄膜折射率明显提高,不过,随着离子束流密度的继续增大,薄膜折射率呈缓慢下降趋势。这是因为在成膜过程中,离子束带有很高的能量轰击薄膜,会将薄膜表面的原子撞入内部,使得薄膜更致密,折射率升高。同时离子束还可以去除薄膜表面的杂质和结瘤,填补表面的空缺,所以薄膜表面的粗糙度较低,其表面形貌如图 4 所示,表 2 为相对应

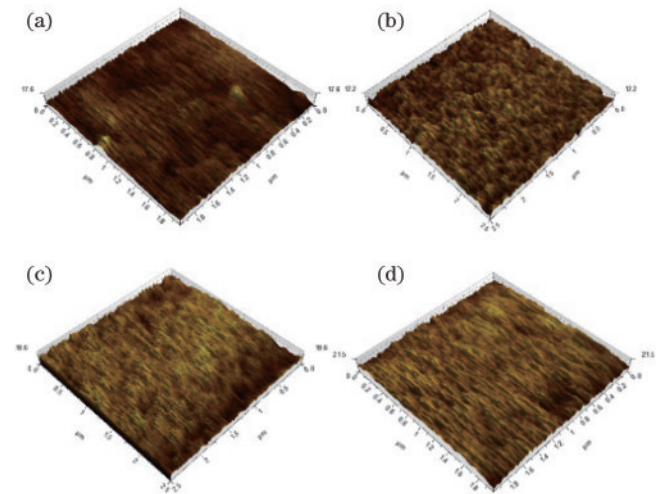


图 4 不同离子束流密度下的 H4 薄膜样品表面形貌的 AFM 图。
(a) 105 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$; (b) 120 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$; (c) 135 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$;
(d) 150 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$
Fig. 4 AFM images of surface morphology of H4 films at different ion-beam densities. (a) 105 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$; (b) 120 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$;
(c) 135 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$; (d) 150 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$

表 2 不同离子束流密度下的 H4 薄膜样品表面的粗糙度

Table 2 Surface roughnesses of H4 films at different ion-beam densities

$J / (\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	R_a / nm	R_q / nm
105	0.455	0.577
120	0.421	0.522
135	0.474	0.602
150	0.618	0.782

的表面粗糙度值。但离子源功率过大,根据 Hoffman 和 Thornton 等提出来的原子、离子钉轧效应模型,会使薄膜产生孔洞和棱柱状的缺陷,表面粗糙度增加,薄膜体积增大,使薄膜内部产生高的压应力,薄膜折射率降低。

用椭偏仪测量了 175 °C, 120 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时 H4 薄膜的消光系数,如图 5 所示,H4 薄膜具有极小的消光系数。

图 6 为利用美国 PerkinElmer 公司的 Lambda1050 十分光光度计测量的后处理的 H4 薄膜的透射率曲线,测试波段范围为 300~1300 nm。从图中可以看出,在

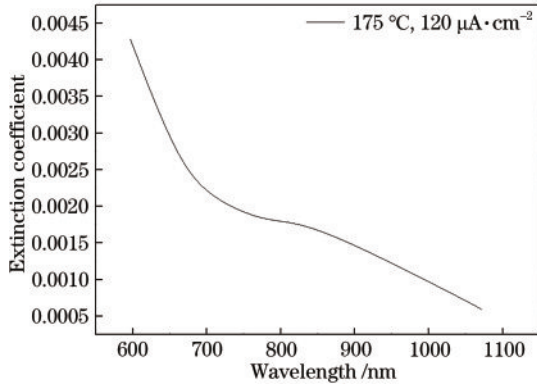


图 5 基底温度为 175 °C、离子束流密度为 120 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 条件下 H4 薄膜的消光系数

Fig. 5 Extinction coefficient of H4 films at substrate temperature of 175 °C and ion-beam density of 120 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$

380~1300 nm 范围内, H4 薄膜的透过率都大于 70%, 曲线在 850 nm 处的震荡是设备换灯引起的, 若实验中 850 nm 为主要测试点, 可以调整换灯位置。在波长 440 nm 和 850 nm 左右, H4 薄膜透射率达到 90% 左右, 与玻璃基底的透射率一致。H4 薄膜作为高折射率

材料, 根据薄膜光学的基本理论, 当薄膜的光学厚度为 $m(\lambda/2)$ (m 为正整数) 时, 薄膜在波长 λ 处为虚设层。由图 6 可见, 薄膜在 980 nm 波长附近达到了理想的虚设效果, 说明 H4 薄膜的吸收完全可以忽略不计。在波长 310 nm 之前, 由于 LaTiO_3 材料的本征吸收, 导致样品透射率急剧下降。由此可见, LaTiO_3 是可见和近红外区的理想镀膜材料。在实验数据范围内随着退火温度的升高、等离子体处理时间的增长, 薄膜透射谱线向短波方向移动。透射率曲线向短波方向飘移表明薄膜的致密性得到提升。薄膜原子获得了高温退火提供的能量, 发生了再运动, 薄膜原子在膜层中扩散, 填充了镀膜过程中引入的缺陷, 蒸发了膜层空隙中的水汽, 使薄膜的松散柱状结构变得致密。根据 $nd = \lambda/4$, 薄膜致密性提高, 则变现为膜层物理厚度 d 降低, 从而 λ 变小, 透射谱线左移。而等离子体后处理主要是利用一定能量的离子束对薄膜进行持续性的轰击, 填补薄膜内部缺陷, 去除薄膜表面的杂质, 从而提高了薄膜的质量。所以薄膜的后处理技术可以进一步提升薄膜质量, 成为研究提升薄膜抗损伤能力的一大热点。

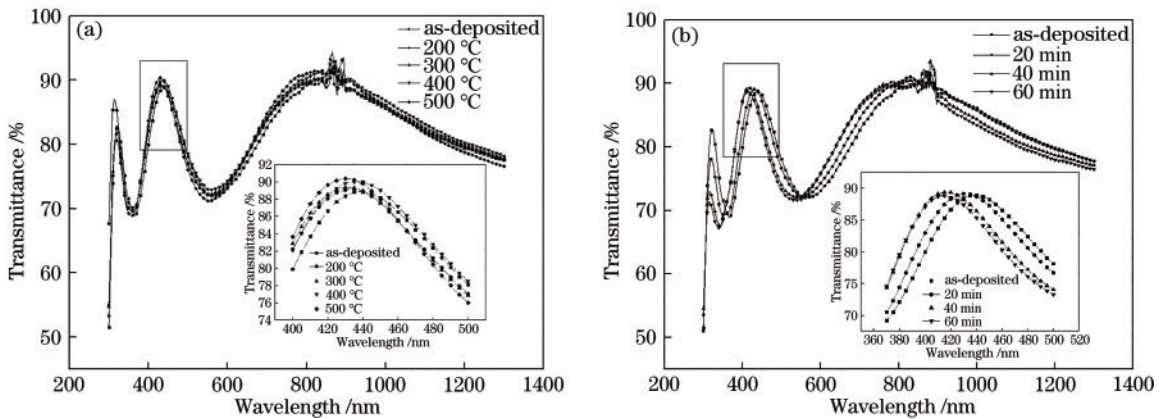


图 6 H4 薄膜后处理的透射率谱线。(a) 高温退火; (b) 等离子体后处理

Fig. 6 Transmittance spectra of H4 films after post-treatment. (a) High temperature annealing; (b) plasma post-treatment

3 高反射膜系设计及实验

3.1 实验过程

经过 H4 薄膜工艺参数的优化后, 选取基底温度为 175 °C, 离子束流密度为 120 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$, 对应的折射率 $n_{980} = 2.07$ 。将优化的工艺参数用 980 nm 高反射(HR)膜的制备实验中, 并与采用 TiO_2 、 Ta_2O_5 作为高折射率材料的 HR 膜进行比较, 考虑到实际应用的情况, 在 K9 玻璃上做了相同结构的 HR 膜, 低折射率材料选择工艺成熟的 SiO_2 。

HR 膜系利用 TFC 仿真模拟软件进行了优化设计。仿真模拟得到的不同材料的反射率曲线如图 7 所示的理论值曲线: 在波长 700~1300 nm 范围内, 反射率在中心波长 980 nm 处达到 95% 以上, 满足 HR 膜的

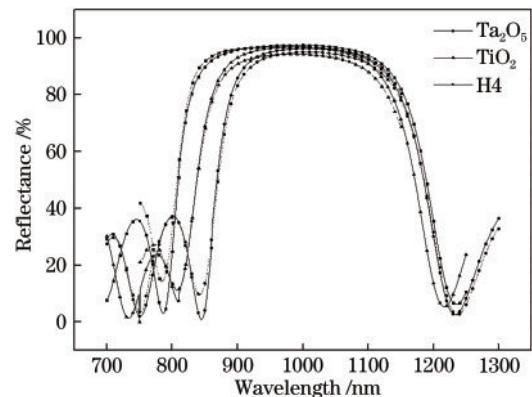


图 7 不同材料的 HR 膜的反射率谱线。实线为理论值; 虚线为实测值

Fig. 7 Reflectance curves of HR films of different materials. Solid line is theoretical value and dotted line is measured value

设计需求。最终确定采用 5 对低、高折射率的膜层, HR 膜膜系结构为:G/(LH)⁵/A, 实验参数如表 3 所示(表中 n_L 和 n_H 分别为低折射率材料和高折射率材料

的折射率, V_L 和 V_H 分别为低折射率材料和高折射率材料的镀膜速率, d_L 和 d_H 分别为低折射率材料和高折射率材料的镀膜厚度)。

表 3 3 种高反膜系的工艺参数

Table 3 Process parameters of three kinds of HR films

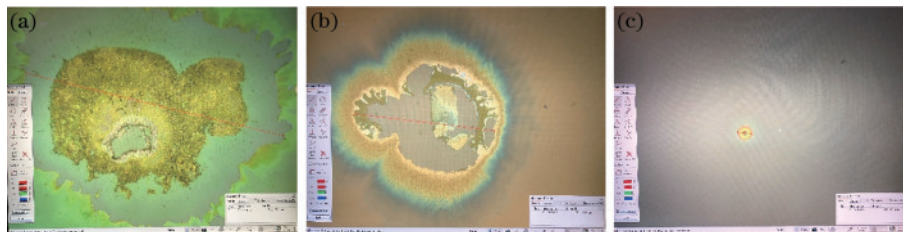
G/(LH) ⁵ /A	n_L	n_H	$V_L / (\text{nm} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_H / (\text{nm} \cdot \text{s}^{-1})$	d_L / nm	d_H / nm
(SiO ₂ /TiO ₂) ⁵	1.46	2.30	0.6	0.3	182.62	122.70
(SiO ₂ /Ta ₂ O ₅) ⁵	1.46	2.08	0.6	0.3	193.30	135.86
(SiO ₂ /H4) ⁵	1.46	2.07	0.6	0.2	182.24	127.47

3.2 结果与分析

HR 膜的反射率曲线采用分光光度计来测试, 如图 7 所示。从测量结果看出, 在中心波长 980 nm 处, H4 膜系的反射率为 95.08%, Ta₂O₅ 膜系的反射率为 94.25%, TiO₂ 膜系的反射率最高, 达到 97.01%, 与仿真模拟数据的误差在合理范围内。

图 8 为在 600 MW/cm² 的激光能量作用下的 HR 膜的损伤形貌。从图中可以看出, 在设定能量均为 600 MW/cm² 激光作用下, 3 组膜系全部发生损伤, TiO₂ 膜系的损伤斑最大。在 500× 的显微镜下观察, TiO₂ 膜系损伤直径约为 523.53 μm, 其次是 Ta₂O₅ 膜系, 损伤直径约为 271.73 μm, H4 膜系的激光损伤斑最小, 损伤直径约为 28.40 μm。TiO₂ 膜系和 Ta₂O₅ 膜系的损伤情况比 H4 膜系严重很多, TiO₂ 膜系和 Ta₂O₅ 膜系的膜层损伤形貌表现为发散式的断层损伤, 中心热量以圆形向外扩散, 损伤边界有明显的烧蚀痕迹, 损

伤区域与未损伤区域界线不规则, 损伤区域膜层脱落且表面粗糙度明显增大。TiO₂ 薄膜和 Ta₂O₅ 薄膜由于其吸收较大, 薄膜在激光的照射下吸收大量激光能量产生高能载流子, 其与原子发生碰撞产生自由电子。在激光的持续照射下自由电子雪崩式增长, 其吸收能量使激光照射区域的热量持续大量的增加, 最后喷溅而出, 导致膜层结构在短时间内被破坏。而 H4 膜系的损伤区域呈规则的圆形, 在损伤位置未出现薄膜脱落的现象, 为明显的烧蚀损伤。H4 薄膜发生的损伤是由缺陷引起的, 缺陷部位在激光的作用下温度急剧升高, 使缺陷周围的薄膜材料吸收热能量产生高能等离子体, 在损伤区域与未损伤区域产生温差, 温差引起的热膨胀最终会在薄膜中产生热应力。当热应力达到临界值时, 薄膜结构就会被破坏, 从而发生损伤。实验结果说明 H4 膜作为 HR 膜的抗激光损伤能力优于 Ta₂O₅ 膜和 TiO₂ 膜。

图 8 HR 膜在 600 MW/cm² 的激光能量作用后的损伤形貌。(a) TiO₂ HR 膜; (b) Ta₂O₅ HR 膜; (c) H4 HR 膜Fig. 8 Damage morphology of HR films under laser power density of 600 MW/cm². (a) HR films of TiO₂; (b) HR films of Ta₂O₅; (c) HR films of H4

4 结 论

采用离子束辅助电子束镀膜技术制备了 H4 薄膜材料, 实验研究了基底温度、离子束流密度、后处理等工艺参数对其光学特性和薄膜质量的影响。结果表明, 适当地增加基底温度和离子束流密度可以提高基底上的薄膜原子的动能, 薄膜致密性得到提升, 进而提高薄膜的折射率。同时利用高温退火和等离子体后处理工艺可以弥补薄膜的缺陷, 使薄膜的致密度增加, 薄膜质量提高。在基底温度为 175 °C, 离子束流密度为 120 μA·cm⁻², 沉积速率为 0.2 nm/s 时, 200 nm 薄膜的折射率 n_{980} = 2.07, 均方根粗糙度 R_q 为 0.522。在此基础上, 利用这种高折射低吸收以及光学性能稳定的 H4

薄膜材料与 SiO₂ 组成 HR 膜系, 结构为 G/(LH)⁵/A, 在 980 nm 处测得反射率为 95.08%, 与理论结果吻合较好。对比研究了膜系结构相同的 3 组 HR 膜 SiO₂/Ta₂O₅、SiO₂/TiO₂ 和 SiO₂/H4 的抗损伤特性, 在 600 MW/cm² 激光能量作用后, SiO₂/Ta₂O₅ 和 SiO₂/TiO₂ HR 膜均出现了严重的雪崩电离击穿式的激光诱导损伤, 而 SiO₂/H4 HR 膜的损伤主要由缺陷引起的, 损伤程度和范围远小于前两者, 说明所制备的 SiO₂/H4 HR 膜具有更好的抗激光损伤能力。

参 考 文 献

- [1] 陈良惠, 杨国文, 刘育衍. 半导体激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500001.

- Chen L H, Yang G W, Liu Y X. Development of semiconductor lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500001.
- [2] 杨爱粉, 张佳, 李刚, 等. 用于定向红外对抗的中波红外激光器技术[J]. 应用光学, 2015, 36(1): 119-125.
Yang A F, Zhang J, Li G, et al. Technology of MWIR laser in directed infrared countermeasure systems[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(1): 119-125.
- [3] Marcu T, Todea M, Gligor I, et al. Effect of surface conditioning on the flowability of Ti_6Al_7Nb powder for selective laser melting applications[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(7): 3276-3282.
- [4] 董家宁. 面发射分布反馈半导体激光器腔面膜与出光口工艺研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
Dong J N. Research on cavity films and light emitting window technology of surface-emitting distributed feedback semiconductor laser[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.
- [5] 王金艳, 张锦龙, 焦宏飞, 等. 121.6 nm 远紫外高反射薄膜研究[J]. 光学学报, 2020, 40(9): 0931001.
Wang J Y, Zhang J L, Jiao H F, et al. Study on high reflective film in 121.6 nm far ultraviolet[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(9): 0931001.
- [6] 刘冬梅, 罗云峰, 付秀华, 等. 低损耗 1064 nm 带通滤光片多层膜的散射特性研究[J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0903004.
Liu D M, Luo Y F, Fu X H, et al. Scattering properties of low-loss 1064 nm bandpass filter multilayer films[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0903004.
- [7] 毛思达, 邹永刚, 范杰, 等. 离子后处理对 TiO_2 光学薄膜及损伤特性的影响[J]. 光学精密工程, 2019, 27(7): 1451-1457.
Mao S D, Zou Y G, Fan J, et al. Influence of plasma treatment on optical and damage properties of TiO_2 thin films[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(7): 1451-1457.
- [8] 段华英, 王星明, 张碧田, 等. 高折射率镀膜材料 $LaTiO_3$ [J]. 稀有金属, 2008, 32(3): 392-394.
Duan H Y, Wang X M, Zhang B T, et al. Coating material of $LaTiO_3$ with high refractive index[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2008, 32(3): 392-394.
- [9] 刘春玲, 王春武, 王广德, 等. 电子束蒸镀 H4 膜工艺及其在 808 nm 激光器腔面膜上的应用[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 3140-3144.
Liu C L, Wang C W, Wang G D, et al. Process investigation of H4 thin film prepared by electron beam evaporation and application on laser diodes cavity coatings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(12): 3140-3144.
- [10] 杭良毅, 徐均琪, 程耀进, 等. 钛酸镧薄膜的制备及工艺优化[J]. 应用光学, 2015, 36(6): 948-954.
Hang L Y, Xu J Q, Cheng Y J, et al. Preparation of $LaTiO_3$ films and process optimization[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(6): 948-954.
- [11] 徐均琪, 杭良毅, 苏俊宏, 等. $LaTiO_3$ 薄膜的光学及激光损伤特性[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(9): 1124-1129.
Xu J Q, Hang L Y, Su J H, et al. Optical properties and laser damages of $LaTiO_3$ coatings[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2015, 35(9): 1124-1129.
- [12] Herrera G, Jiménez-Mier J, Chavira E. Layered-structural monoclinic-orthorhombic perovskite $La_2Ti_2O_7$ to orthorhombic $LaTiO_3$ phase transition and their microstructure characterization[J]. Materials Characterization, 2014, 89: 13-22.
- [13] 李文涛, 梁艳, 王炜华, 等. $LaTiO_3(110)$ 薄膜分子束外延生长的精确控制和表面截止层的研究[J]. 物理学报, 2015, 64(7): 078103.
Li W T, Liang Y, Wang W H, et al. Precise control of $LaTiO_3(110)$ film growth by molecular beam epitaxy and surface termination of the polar film[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(7): 078103.
- [14] 王征. 氮化硼陶瓷晶粒尺寸和晶型对力学及抗溅射性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
Wang Z. Influence of grain size and crystal type on the mechanical properties and sputtering resistance of BN ceramics[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [15] 赵广宇, 徐莉, 范杰, 等. 衬底温度对电子束沉积 ZnSe 薄膜性能影响研究[J]. 光子学报, 2021, 50(6): 0631001.
Zhao G Y, Xu L, Fan J, et al. Influence of substrate temperature on properties of ZnSe thin films deposited by electron-beam evaporation[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(6): 0631001.