

工艺参数对硫化锌薄膜光学性能和 结晶特性的影响

李坤, 熊玉卿, 王虎, 何延春, 王兰喜, 周超, 周晖

(兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室, 兰州 730000)

摘 要: **目的** 研究离子源偏压和沉积温度的变化对硫化锌薄膜光学性能和结晶性能的影响规律。**方法** 采用电子束蒸发技术, 在 K9 玻璃基片上制备了硫化锌薄膜。采用分光光度计测试了薄膜的光学性能, 利用光谱反演法得出薄膜的折射率和消光系数随波长的变化规律。采用 X 射线衍射法测试薄膜的结晶状态。**结果** 随着离子源偏压的增加, 薄膜折射率逐渐减小, 但变化幅度不大, 当离子源偏压为 160 V 时, 1000 nm 波长处的薄膜折射率达到最小值 2.210。开启加热之后, 薄膜折射率显著提高, 且随着沉积温度的升高, 薄膜折射率逐渐增大, 沉积温度为 210 °C 时, 1000 nm 波长处薄膜折射率达到最大值 2.312。两种工艺参数下制备的薄膜, 其消光系数均很小。单纯的离子源辅助沉积时, 薄膜生长择优取向是(220)晶向, 而基底加热状态下沉积的薄膜生长择优取向是(111)晶向。随着离子源偏压增加, 薄膜(220)峰的衍射强度降低。沉积温度越高, 薄膜(111)峰的衍射强度越大。**结论** 硫化锌薄膜的光学特性对沉积温度的变化更为敏感, 离子源偏压和沉积温度的改变均能显著影响硫化锌薄膜的结晶状态。

关键词: 电子束蒸发; 硫化锌; 薄膜; 偏压; 温度; 折射率; 结晶

中图分类号: O484.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)06-0184-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.06.019

Effects of Process Parameters on Optical Properties and Crystallization Characteristics of Zinc Sulfide Films

LI Kun, XIONG Yu-qing, WANG Hu, HE Yan-chun, WANG Lan-xi, ZHOU Chao, ZHOU Hui

(Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory,
Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

ABSTRACT: The influence of ion source bias voltage and deposition temperature on the optical properties and crystallization properties of zinc sulfide films is studied. The ZnS film is prepared on K9 glass substrate by electron beam evaporation technology. A spectrophotometer is used to test the optical properties of the film. The change rules of the refractive index and

收稿日期: 2020-06-14; 修订日期: 2020-10-09

Received: 2020-06-14; Revised: 2020-10-09

基金项目: 装备预研重点实验室基金项目 (6142207190407)

Fund: Supported by the Funding Project of Key Laboratory for Equipment Pre-research (6142207190407)

作者简介: 李坤 (1988—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为表面工程。

Biography: LI Kun (1988—), Male, Doctor, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 熊玉卿 (1969—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为表面工程。邮箱: xiongyq@hotmail.com

Corresponding author: XIONG Yu-qing (1969—), Male, Doctor, Professor, Research focus: surface engineering. E-mail: xiongyq@hotmail.com

引文格式: 李坤, 熊玉卿, 王虎, 等. 工艺参数对硫化锌薄膜光学性能和结晶特性的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(6): 184-192.

LI Kun, XIONG Yu-qing, WANG Hu, et al. Effects of process parameters on optical properties and crystallization characteristics of zinc sulfide films[J]. Surface technology, 2021, 50(6): 184-192.

extinction coefficient of the film are obtained by the spectral inversion method. The crystal state of the film is tested by X-ray diffraction method. As the bias of the ion source increases, the refractive index of the film gradually decreases, but the change range is not large. When the ion source bias voltage is 160 V, the refractive index of the film at a wavelength of 1000 nm reaches a minimum value of 2.210. After the heating is turned on, the refractive index of the film increases significantly. As the deposition temperature increases, the refractive index of the film gradually increases. When the deposition temperature is 210 °C, the refractive index of the film at a wavelength of 1000 nm is 2.312 at the maximum. The extinction coefficients of the films prepared under the two process states are very small. The preferred orientation of film growth during ion-assisted deposition is the (220) crystal orientation. The preferred orientation of the film deposited under the heating state of the substrate is the (111) crystal orientation. As the ion source bias increases, the diffraction intensity of the thin film (220) peak decreases. The higher the deposition temperature is, the greater the diffraction intensity of the thin film (111) peak. Through the research in this paper, it is found that the optical characteristics of the zinc sulfide film are more sensitive to changes in deposition temperature. Both the ion source bias and the change in deposition temperature can significantly affect the crystalline state of the zinc sulfide film.

KEY WORDS: electron beam evaporation; zinc sulfide; films; bias voltage; temperature; refractive index; crystallization

硫化锌 (ZnS) 具有优良的光学、电学、热学特性, 在航空航天领域有着广泛的应用。其透光范围很宽, 在 0.4~14 μm 的宽光谱内具有高透射率, 可单独作为导弹整流罩、飞机光电吊舱等部件的红外窗口材料^[1-3], 也可以和 Ge、PbTe、YF₃ 等材料组合, 制备成各种滤光片、反射膜、增透膜等^[4-7]。近年来, 随着半导体发光材料和 CIGS、CZTS 等薄膜太阳能电池技术的迅猛发展^[8-9], 硫化锌薄膜材料再次引起人们的广泛关注。

硫化锌薄膜的制备方法有很多种, 最常用的制备方法是电子束蒸发、磁控溅射、溶胶凝胶法等^[10-14], 其他的制备方法, 如原子层沉积、脉冲激光沉积、分子束外延等新技术, 也在逐步发展中^[15-18]。不同的薄膜制备技术各有优缺点, 电子束蒸发镀膜工艺拥有沉积速率高、均匀性好等优异特性, 基于此, 本文选用电子束蒸发方式, 研究了不同的工艺参数对硫化锌薄膜性能的影响规律。

近年来, 在采用电子束蒸发技术研究硫化锌薄膜的文献中, 天津航技术物理研究所的刘华松等^[19]研究了真空热处理对硫化锌薄膜光学与微结构的影响, 分析了薄膜的吸收率、禁带宽度、表面微结构等性能随热处理温度的变化趋势。上海技术物理研究所的于天燕等^[20]从红外应用的角度出发, 研究了沉积温度对硫化锌薄膜红外波段折射率的影响规律, 指出在 190 °C 以上制备的样品可满足空间薄膜器件的使用要求。以上文献报道中均使用霍尔离子源或考夫曼离子源进行辅助沉积, 而本文采用的 APS 型高能离子源具有能量更大、束流更集中的特性。中科院光电技术研究所的艾万君^[21]、申林^[22]、Zhang 等^[23]采用 APS 离子源, 研究了偏压特性对 HfO₂、YF₃ 薄膜特性的影响, 并且比较了霍尔源和 APS 源的技术特性, 指出 APS 源制备的薄膜吸收率更低。目前来看, 国内采用 APS 离子源研究硫化锌薄膜性能的文章还未见报道,

本文采用 APS 离子源研究硫化锌薄膜的性能变化具有一定的创新性。另外, 薄膜制备过程中, 真空度、离子源能量、蒸发速率、沉积温度等工艺参数的改变, 都会影响薄膜的光学性能和结晶特性等, 本文创新性地将离子源和沉积温度结合在一起研究, 较系统地阐述了这两项参数对硫化锌薄膜光学性能和结晶特性的影响。

1 试验

本文的薄膜样品采用电子束蒸发镀膜的方式进行制备, 镀膜设备为 Leybold 全自动光学蒸发镀膜机。通常原材料颗粒的纯度、大小等对蒸发薄膜的性能也有一定影响, 为了避免原材料不同造成的实验误差, 本文采用的蒸发材料均为优美科公司生产的同一批次高纯度硫化锌颗粒, 其纯度为 99.999%, 尺寸为 5~9 mm。采用双面抛光的 K9 玻璃作为基底材料, 基底尺寸 30 mm×1 mm。实验前, 首先采用无水乙醇 (分析纯) 和丙酮以 1:1 的体积比配制清洗液, 将待镀膜 K9 基底材料置于清洗液中, 然后放入超声波清洗机中清洗 10 min 以上, 去除基底材料表面的油污和杂质, 用高压氮气将待镀膜基底吹干后, 放入真空室。开启真空抽气系统, 当本底真空达到 8.0×10^{-4} Pa 以下, 打开 APS 型高能离子源进行基底轰击, 轰击时间为 300 s。

在硫化锌薄膜的制备过程中, 分别研究离子源偏压和沉积温度这两个工艺参数对硫化锌薄膜性能的影响规律。首先, 设定 APS 高能离子源的放电电流为 50 A, 工作气体 Ar 的流量为 15 mL/min, 离子源的偏压分别设置为 100、120、140、160 V, 制备薄膜样品。其次, 保持离子源辅助的情况下, 开启基板加热, 分别将镀膜时的沉积温度设定为 120、150、180、210 °C, 制备薄膜样品。在镀膜过程中, 两

种参数制备的薄膜沉积速率均设定为 1.0 nm/s, 薄膜厚度均为 1000 nm, 沉积速率和厚度由石英晶振系统来监测和控制, 制备过程中的各参数设置如表 1 所示。

表 1 薄膜制备过程中的参数
Tab.1 Parameters in the film preparation process

Sample	Ion source parameters			Deposition temperature/°C
	Bias voltage/V	Gas flow/(mL·min ⁻¹)	Discharge current/A	
1	100	15	50	No heating
2	120	15	50	No heating
3	140	15	50	No heating
4	160	15	50	No heating
5	100	15	50	120
6	100	15	50	150
7	100	15	50	180
8	100	15	50	210

利用美国 PE 公司 Lamda 950 型紫外-可见-近红外分光光度计测试硫化锌薄膜的透射率, 测试的波长为 500~2000 nm, 波长的扫描间隔是 1 nm。同时利用日本理学公司 Smartlab 型 X 射线衍射仪测试制备的硫化锌薄膜样品的结晶特性, 扫描角度为 20°~80°。

2 结果及分析

2.1 离子源偏压对 ZnS 薄膜光学性能和结晶特性的影响

为了改善蒸发镀膜的膜层附着力, 通常在制备过程中可以开启离子源进行辅助沉积。离子源的种类有多种, 最常用的是霍尔型和考夫曼型。APS 型离子源是莱宝光学公司为解决薄膜的高吸收特性而研制的高能离子源, 相比于传统的霍尔型或考夫曼型离子源, 可实现薄膜的低温沉积。对于 APS 型离子源来说, 偏压越大, 说明产生的离子束流的能量越大。首先在不加热基板的情况下, 研究了离子源偏压对硫化锌薄膜性能的影响。

当离子源偏压设定不同值时, 制备的硫化锌薄膜样品的透射率测试曲线如图 1 所示。从图中可以看出, 不同离子源偏压下制备的薄膜样品的透射率相差不大, 光谱曲线的波形比较一致。进一步观察可知, 随着离子源的偏压从 100 V 逐渐增加到 160 V, 样品的透射率曲线有向短波方向微小移动的趋势。根据光学薄膜的原理可知, 薄膜的光学厚度在减小。

在薄膜的光学特性中, 通常以研究薄膜的折射率和消光系数这两个参数为主。折射率反映了薄膜的光学色散性能, 消光系数则代表了薄膜的光学吸收特

性。这两个光学参数可以通过图 1 中的透射率曲线反演计算得到。本文以 Cauchy 模型为基础, 采用文献 [24-25] 中介绍的包络线全光谱拟合反演法, 得出了所制备的硫化锌薄膜样品的折射率、消光系数随波长的变化曲线, 分别如图 2 和图 3 所示。从图 2 的薄膜折射率变化曲线来看, 随着离子源偏压的增大, 薄膜的折射率逐渐减小, 不过变化幅度较小。从图 3 可以看

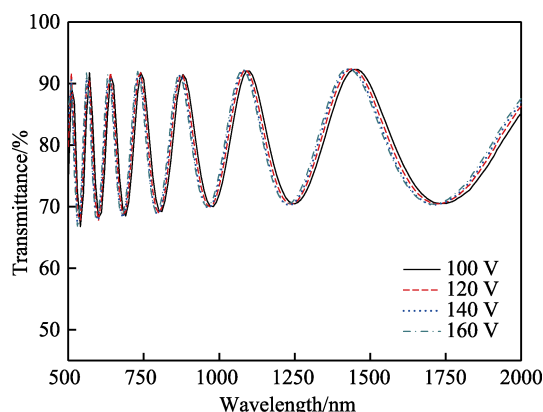


图 1 不同离子源偏压下薄膜的透射率
Fig.1 Transmittance of thin film under different ion source bias

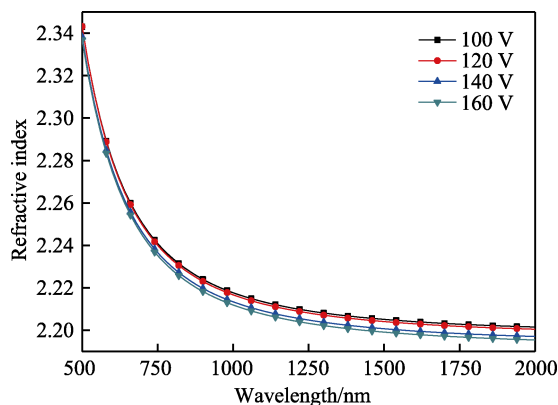


图 2 不同离子源偏压下薄膜折射率随波长的变化曲线
Fig.2 Variation curves of film refractive index with wavelength under different ion source bias

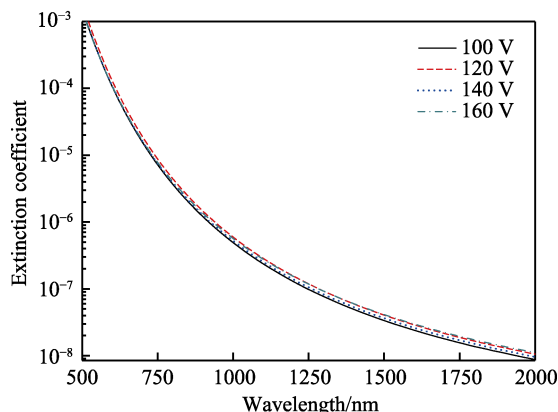


图 3 不同离子源偏压下薄膜消光系数随波长的变化曲线
Fig.3 Variation curves of film extinction coefficient with wavelength under different ion source bias

出,在大于 1000 nm 的红外波段处,硫化锌薄膜的消光系数小于 1×10^{-6} ,且随工艺参数的变化基本保持不变。因此,在研究薄膜的光学性质时,只需重点关注折射率随工艺参数的变化情况即可。

从图 2 中分别选择 750、1000、1250、1500 nm 波长处的折射率,见表 2,以说明不同偏压制备的薄膜折射率的变化情况。

表 2 不同偏压下薄膜的折射率
Tab.2 Refractive index of film under different bias

Wavelength/nm	100 V	120 V	140 V	150 V
750	2.243	2.241	2.238	2.236
1000	2.218	2.217	2.213	2.210
1250	2.209	2.208	2.205	2.203
1500	2.205	2.204	2.201	2.199

为了更直观地描述折射率与离子源偏压的关系,选择了表 2 中波长为 1000 nm 时样品的折射率数值,绘制出图 4 所示的关系图。从图中可以看出,当偏压为 100 V 时,薄膜的折射率有最大值 2.218;当偏压逐步增加时,折射率呈现出微小的降低趋势;当偏压为 160 V,薄膜折射率达到最小值 2.210,变化幅度不大,说明镀膜过程中,离子源的偏压对薄膜折射率的影响较小。通常认为,薄膜表面越致密,薄膜的折射率会越大。镀膜过程中增加了离子源辅助,薄膜分子在生长过程中具有较大的迁移能,容易形成致密的薄膜结构。当离子源的偏压达到 100 V 以上时,薄膜表面已经达到较为致密的状态,再增加离子源能量,薄膜的致密度不会有显著提高,因此折射率变化不明显,相反,过大的离子源能量反而会造成薄膜表面微弱的损伤,使折射率有略微下降的趋势。

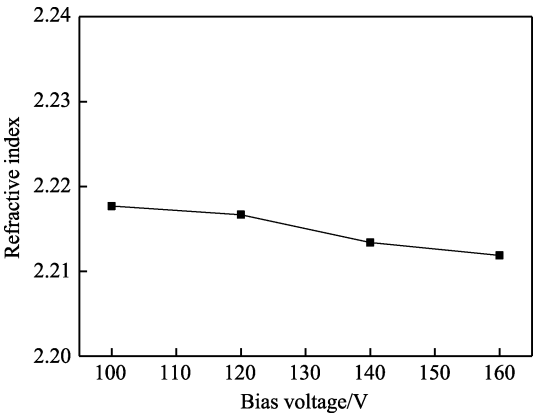


图 4 薄膜折射率与偏压的关系
Fig.4 Relation between film refractive index and bias

上述的光学特性分析主要为可见光和近红外波段,而硫化锌薄膜材料在中远红外波段也有广泛应用,为此我们进一步研究了其中远红外波段折射率和消光系数的变化曲线。通常 K9 玻璃在长波红外区间不透明,因此不能通过直接测试光谱进行反演计算。我们采用的方法是,测试薄膜在 500~2000 nm 的透射率,进行反演计算。每一种镀膜工艺参数可得到一个特定数值的 Cauchy 方程,在此方程的基础之上,可以推算出长波红外的折射率和消光系数,其结果如图 5 所示。从图 5a 的折射率变化曲线可知,在 2000~10 000 nm 的中远红外波段内,随着离子源偏压的升高,折射率逐渐减小。这一变化趋势与图 2 的变化趋势是相同的,说明 ZnS 薄膜的折射率在中远红外波段的变化和近红外波段的变化一致。由图 5b 的消光系数变化曲线可知,在中远红外波段内,消光系数变化不大,在波长大于 6000 nm 的红外波段,不同离子源偏压下制备的薄膜的消光系数均小于 1×10^{-9} 。

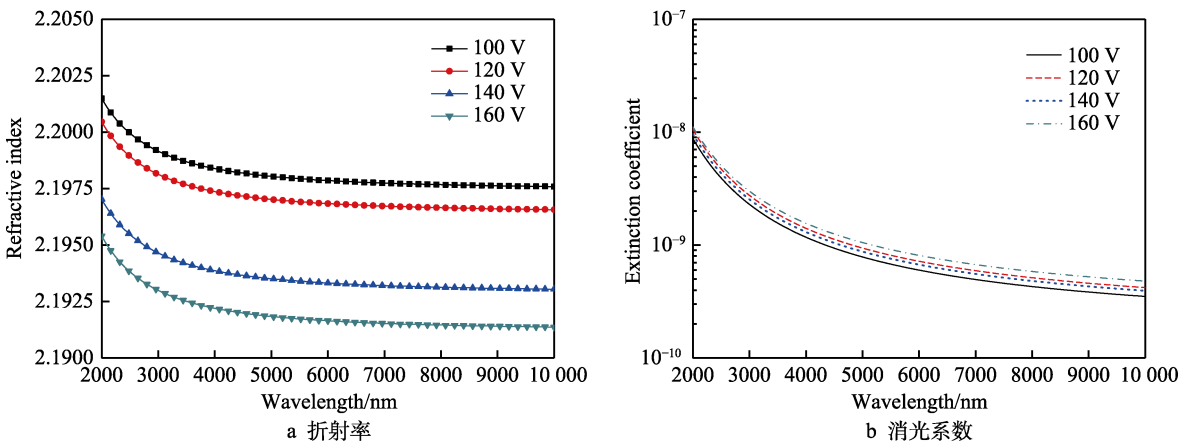


图 5 离子源偏压对薄膜中远红外波段折射率和消光系数的影响
Fig.5 Influence of ion source bias on the refractive index and extinction coefficient of film in the far-infrared band: a) refractive index; b) extinction coefficient

离子源偏压对硫化锌薄膜的结晶特性有显著的影响,图 6 是薄膜样品的 XRD 图谱。从图中可以看出,在 28° 、 47° 和 57° 的衍射角度下,不同偏压制备

的薄膜样品均出现了衍射峰,与 XRD 标准图谱对比可知,制备的硫化锌薄膜是立方闪锌矿结构,各角度分别对应(111)、(220)和(311)衍射峰。当离子源的偏

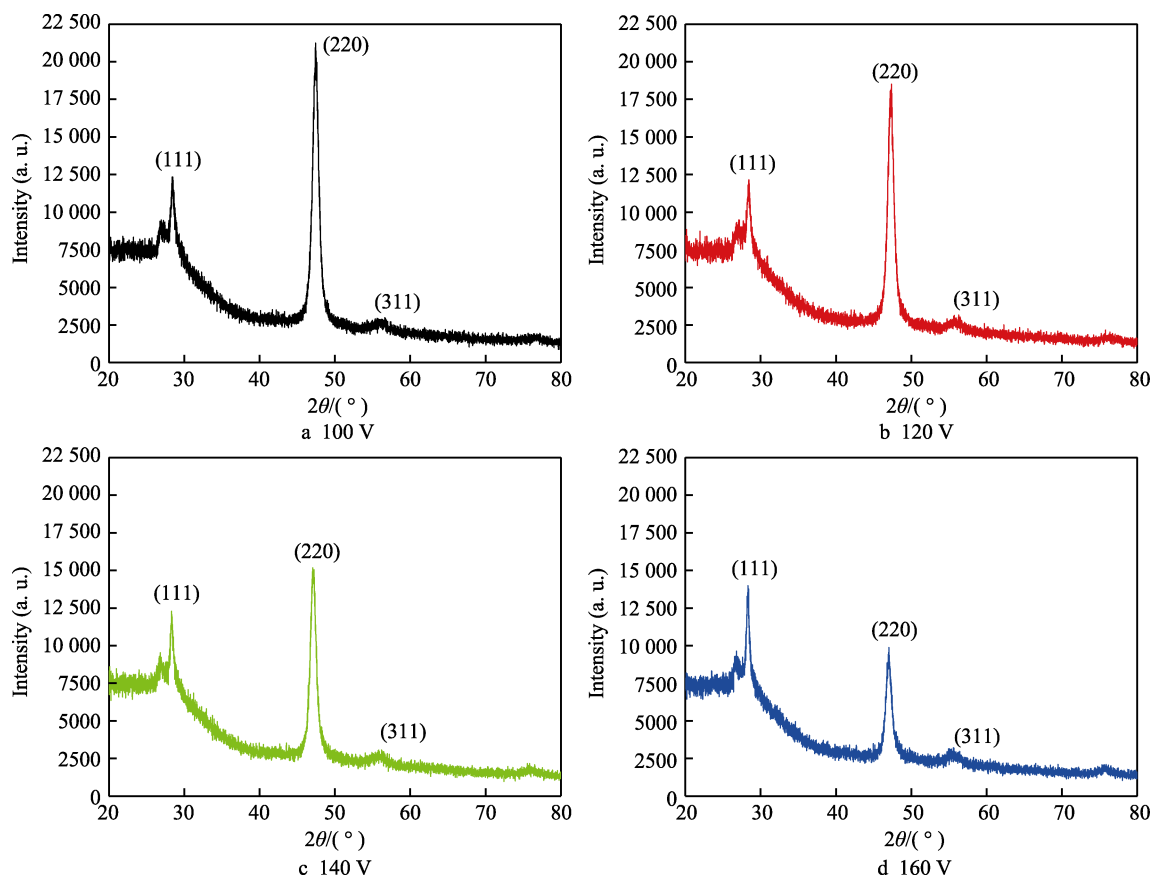


图6 不同偏压制备的薄膜样品的 XRD 图

Fig.6 XRD patterns of thin film samples prepared under different bias

压逐渐增大时, (111)、(311)对应的衍射峰强度基本保持不变, 而(220)峰的衍射强度逐渐下降。离子源的偏压为 100、120、140 V 时, 薄膜样品的衍射峰均以 (220)峰为主; 当偏压增加到 160 V 时, (220)峰的衍射强度急剧下降, 样品以(111)峰为主, 薄膜结晶的择优取向发生了转移。这可能是由于镀膜过程中增加了离子源辅助沉积, 加大了分子在薄膜表面的迁移, 可以诱导薄膜沿(220)晶面生长, 但是当能量过大时会抑制薄膜(220)晶面的生长, 导致薄膜向(111)晶面转变。

2.2 沉积温度对 ZnS 薄膜光学性能和结晶特性的影响

在电子束蒸发镀膜时, 沉积温度同样是一个非常关键的工艺参数, 温度决定着薄膜生长时的凝结状态, 不同沉积温度下制备的薄膜性能往往差异较大。为了研究离子源偏压和沉积温度共同作用下薄膜的性能变化规律, 在保持离子源辅助的前提下, 开启加热。图 7 是当沉积温度分别设置为 120、150、180、210 °C 时, 所制备硫化锌薄膜的透射率光谱测试曲线。从图中可以看出, 薄膜的透射率发生了明显的变化, 随着沉积温度的升高, 薄膜的透射率向长波方向偏移, 说明其光学厚度变大。

采用同样的方法, 得到不同沉积温度下制备的薄膜的折射率和消光系数, 如图 8、9 所示。从图 8 可

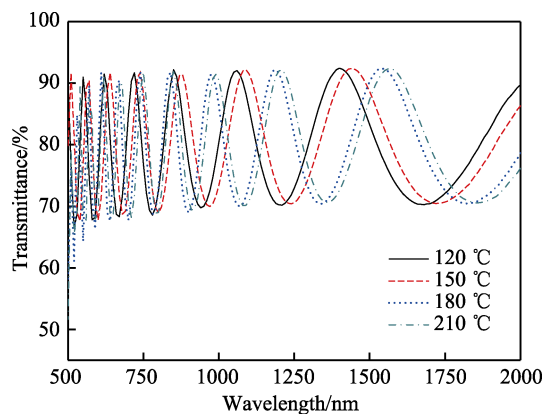


图7 不同沉积温度下薄膜的透射率

Fig.7 Film transmittance under different deposition temperatures

以看出, 随着沉积温度的上升, 薄膜的折射率有明显的升高趋势。当沉积温度为 120 °C 时, 折射率最小; 而当沉积温度为 210 °C 时, 折射率最大。消光系数也随着沉积温度的变化, 发生了明显的分离。120 °C 和 150 °C 时, 消光系数较低; 而 180 °C 和 210 °C 时, 消光系数较高, 并且 180 °C 和 210 °C 下, 薄膜的消光系数有重叠。在大于 1000 nm 的红外波段, 不同沉积温度下制备的薄膜的消光系数均小于 1.0×10^{-5} 。造成这一现象的原因可能是, 随着温度的升高, 膜层逐渐趋于致密, 但是在薄膜结晶过程中, 表面形成细微的孔洞, 导

致薄膜的吸收增加，因此消光系数有变大的趋势。

同样的，从图 8 中分别选择 750、1000、1250、1500 nm 波长处的折射率，见表 3，以说明不同沉积温度下制备的薄膜折射率的变化情况。

根据表 3 中的数据，选取了波长 1000 nm 处的折

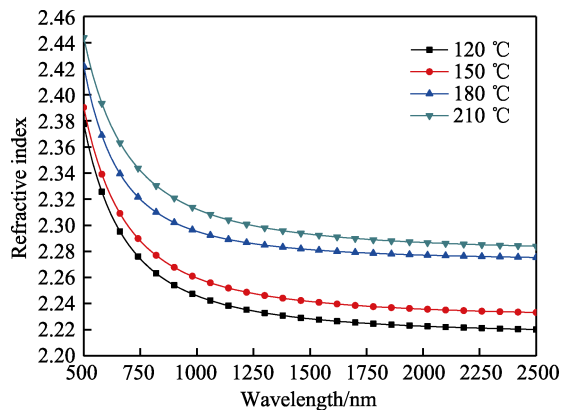


图 8 不同沉积温度下薄膜折射率随波长的变化
Fig.8 Variation curves of film refractive index with wave-length under different deposition temperatures

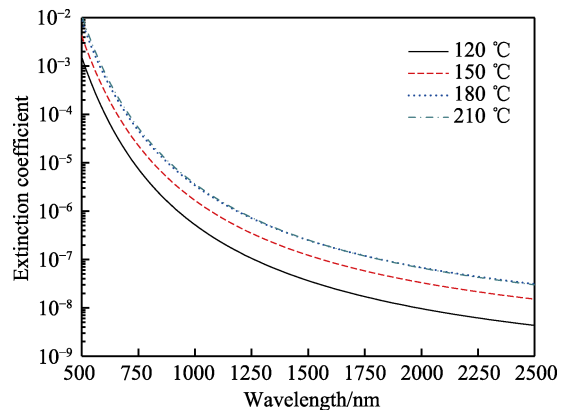
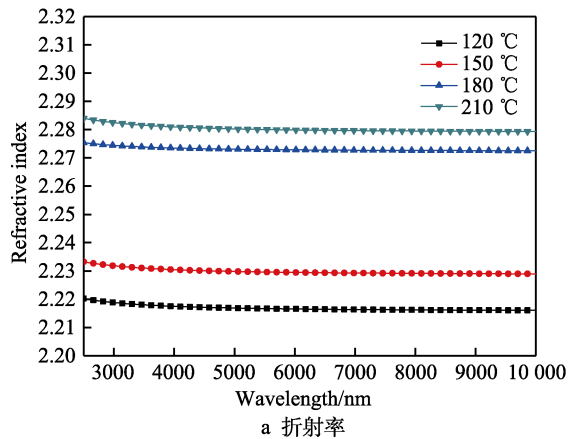


图 9 不同沉积温度下薄膜消光系数随波长的变化
Fig.9 Variation curves of film extinction coefficient with wavelength under different deposition temperatures



射率绘制了如图 10 所示的沉积温度与折射率的关系曲线。从图中可以看出，当沉积温度为 120 °C 时，硫化锌薄膜的折射率最小，为 2.246；随着温度的升高，薄膜折射率显著提升，当温度为 210 °C 时，薄膜折射率达到了最大值 2.312。这说明薄膜的折射率对沉积温度的变化比较敏感。沉积温度越高，蒸发分子到达基底材料表面的动能越大，越容易形成连续致密的薄膜，所以薄膜的折射率也会有相应的提高。

将上述的研究拓展到中远红外波段，得到了薄膜折射率和消光系数与沉积温度之间的关系曲线，如图 11 所示。从图 11a 所示的折射率与温度的关系曲线可

表 3 不同沉积温度下薄膜的折射率				
Tab.3 Refractive index of thin film at different deposition temperatures				
Wavelength/nm	120 °C	150 °C	180 °C	210 °C
750	2.276	2.289	2.322	2.344
1000	2.246	2.260	2.295	2.312
1250	2.234	2.248	2.286	2.300
1500	2.228	2.242	2.281	2.293

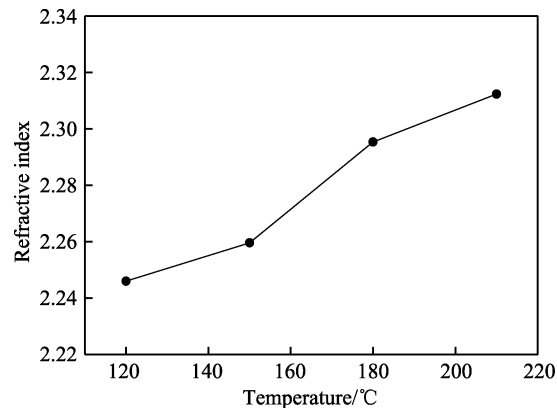


图 10 薄膜折射率与沉积温度的关系
Fig.10 Relation between film refractive index and deposition temperature

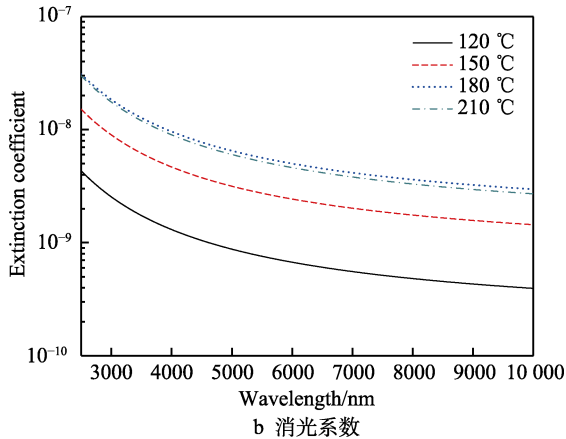


图 11 沉积温度对薄膜中远红外波段折射率和消光系数的影响
Fig.11 The influence of deposition temperature on the refractive index and extinction coefficient of the film in the far infrared band: a) refractive index; b) extinction coefficient

知,随着沉积温度的升高,薄膜在中远红外波段内的折射率也是逐渐变大的,这与在可见及近红外区的变化趋势是一致的。从图 11b 的薄膜消光系数的变化曲线可知,在波长大于 5000 nm 的红外区,不同沉积温度下制备的薄膜的消光系数均小于 1.0×10^{-8} 。

研究了不同沉积温度对硫化锌薄膜结晶特性的影响,图 12 是制备的薄膜样品的 XRD 图谱,与单纯的离子源辅助沉积制备的薄膜的结晶特性有很大差异。在开启基底加热之后,不同沉积温度下制备的薄膜样品均呈现多晶状态,(111)峰衍射强度最高,说明

(111)晶面是薄膜的优先结晶取向。在较低的温度下,如 120 °C 和 150 °C 时,薄膜样品还存在(220)峰。随着镀膜过程中沉积温度的上升,(111)峰强度显著变大,而(220)峰逐渐消失,当沉积温度升高到 210 °C 时,(111)衍射峰的强度达到了最大值。说明随着沉积温度的升高,硫化锌薄膜(111)晶面成为择优取向。认为产生这种现象的原因可能是,随着沉积温度的升高,ZnS 分子到达基底时的动能增加,容易加剧薄膜分子的凝结,形成连续致密的薄膜,因为立方(111)晶面的表面能最低^[26],所以(111)晶面更容易实现择优生长。

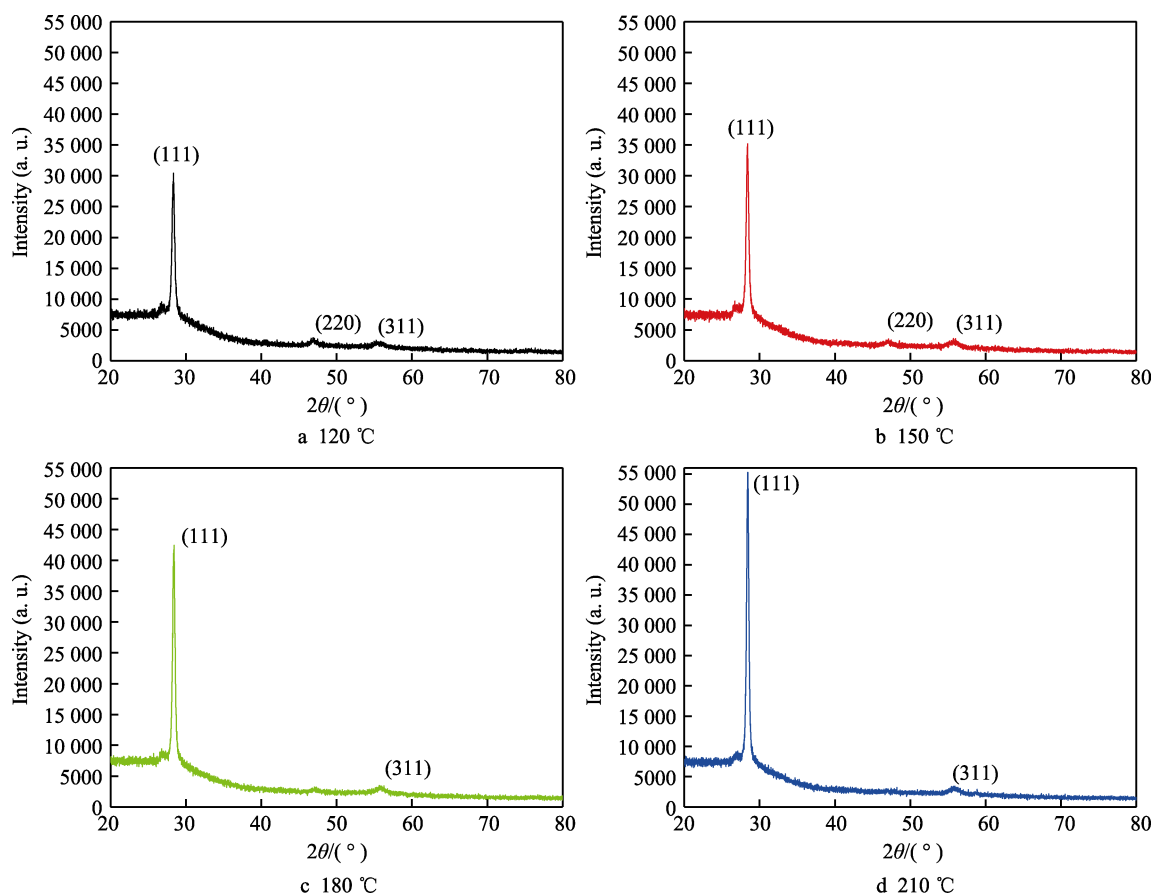


图 12 不同沉积温度制备的薄膜样品的 XRD 图

Fig.12 XRD patterns of thin film samples prepared under different deposition temperatures

2.3 两种参数的对比

对比表 2 和表 3、图 4 和图 10 的结果,可以明显看出,单纯的离子束辅助沉积制备的薄膜折射率区别不大,并且折射率的值较低,在 1000 nm 波长处,折射率在 2.210~2.218。当开启加热后,薄膜的沉积状态发生了明显转换,薄膜折射率有了大幅提高,同样在 1000 nm 波长处,折射率在 2.246~2.312。对比图 6 和图 12 的 XRD 图谱可看出,离子源辅助沉积下,薄膜的结晶状态以(220)峰为主,而在加热状态下,薄膜的结晶状态转变以(111)峰为主。这说明,相对于离子源偏压,镀膜过程中沉积温度的变化对薄膜状态的影响占主导地位。

3 结论

1) 从可见近红外和中长波红外折射率变化曲线可知,当偏压逐步增加时,硫化锌薄膜折射率有微弱下降趋势,但变化幅度不大。当离子源的偏压为 160 V 时,薄膜的折射率最小。从变化趋势来看,镀膜过程中离子源的偏压对薄膜折射率的影响较小。同样从折射率变化曲线可知,当开启加热之后,薄膜折射率曲线有显著变化,随着沉积温度的升高,薄膜折射率明显变大,当沉积温度达到 210 °C 时,薄膜的折射率最大,说明薄膜的折射率对沉积温度的变化比较敏感。不同工艺参数制备的薄膜消光系数均较小,消光

系数对工艺参数的变化不敏感。

2) 工艺参数对硫化锌薄膜的结晶特性影响较大。单纯以离子源辅助沉积时, 薄膜以(220)晶面为主, 随着离子源偏压的增加, (220)峰的衍射强度逐渐降低, 当离子源偏压为 160 V 时, 出现(220)晶面向(111)晶面转变的趋势。开启加热装置对基底材料进行加热之后, 制备的薄膜以(111)晶面为主, 且随着沉积温度的上升, 薄膜的(111)峰衍射强度逐渐加强, 当温度升高到 210 °C 时, 衍射峰的强度达到最大。

3) 硫化锌薄膜的折射率更容易受镀膜过程中沉积温度的影响, 因此在制备薄膜时应着重注意温度变化。

参考文献:

- [1] 袁竭, 隆永胜, 赵顺洪, 等. 电弧风洞模拟 ZnS 红外窗口表面温度响应[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(6): 0604001.
YUAN Jie, LONG Yong-sheng, ZHAO Hong-shun, et al. Simulation of ZnS infrared window surface temperature response by arc-heated wind tunnel[J]. Infrared and laser engineering, 2017, 46(6): 0604001.
- [2] SANJEE K, VERMA N K, SINGLA M L. Reflective properties of ZnS nanoparticle coatings[J]. Journal of coatings technology and research, 2011, 8(2): 223-228.
- [3] 陈焱, 罗崇泰, 王多书, 等. 离子束辅助沉积和真空退火对硫化锌薄膜应力的影响[J]. 真空科学与技术学报, 2009, 29(z1): 55-58.
CHEN Tao, LUO Chong-tai, WANG Duo-shu, et al. Influence of ion beam assistance deposition and annealing on stress in ZnS films[J]. Journal of vacuum science and technology, 2009, 29(z1): 55-58.
- [4] ZHANG Yin-hua, XIONG Sheng-ming, HUANG Wei, et al. Six-spectral antireflection coating on zinc sulfide simultaneously effective for the visible, near-IR, and long wavelength IR regions[J]. Surface & coatings technology, 2019, 359: 1-5.
- [5] QI Dong, WANG Xian, CHENG Yong-zhi. Design and characterization of one-dimensional photonic crystals based on ZnS/Ge for infrared-visible compatible stealth applications[J]. Optical materials, 2016, 62: 52-56.
- [6] AHMADVAND H, MOGHADAM Z. Design and fabrication of multi-layers infrared antireflection coating consisting of ZnS and Ge on ZnS substrate[J]. Infrared physics & technology, 2016, 75: 18-21.
- [7] 于天燕, 朱福荣, 刘定权, 等. 硫化锌透镜中长波红外宽带增透膜的研制[J]. 光学学报, 2005, 25(2): 270-273.
YU Tian-yan, ZHU Fu-rong, LIU Ding-quan, et al. Design and deposition of broadband IR antireflection coatings on ZnS lenses[J]. Acta optica sinica, 2005, 25(2): 270-273.
- [8] LI Wei, CHEN Jian, YAN Chang, et al. The effect of ZnS segregation on Zn-rich CZTS thin film solar cells[J]. Journal of alloys and compounds, 2015, 632: 178-184.
- [9] 党向瑜. 铜铟镓硒太阳能电池中 ZnS 缓冲层的优化制备研究[D]. 天津: 南开大学, 2010.
DANG Xiang-yu. Directed growth of ZnS buffer layer by modified chemical bath deposition in CIGS thin film solar cells[D]. Tianjin: Nankai University, 2010.
- [10] FAIAZUL H, KAZI S R, MOHAMMAD A I, et al. Effects of growth temperatures on the structural and optoelectronic properties of sputtered zinc sulfide thin films for solar cell applications[J]. Optical and quantum electronics, 2019, 51(8): 1-13.
- [11] ZHANG Yin-hua, ZHANG Ke-peng, HUANG Wei, et al. Determination of infrared refractive index of ZnS and YbF₃ thin films by spectroscopy[J]. Optik, 2018, 170: 321-327.
- [12] KISSANI A E, HAJ D A, DADS H A, et al. Optimization of the annealing temperature for formation of spin-coated copper zinc tin sulfide thin films without sulfurization step[J]. Spectroscopy letters, 2020, 53(2): 123-131.
- [13] 赵培, 刘定权, 徐晓峰, 等. 溅射条件对 ZnS 薄膜的光学常量和微结构的影响[J]. 光子学报, 2008, 37(12): 2483-2485.
ZHAO Pei, LIU Ding-quan, XU Xiao-feng, et al. Optical constants and microstructure of the ZnS film by RF sputtering[J]. Acta photonica sinica, 2008, 37(12): 2483-2485.
- [14] 石刚, 李亚军, 左少华, 等. 原位退火对磁控溅射制备的 ZnS 薄膜微结构和发光性能的影响[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(6): 507-510.
SHI Gang, LI Ya-jun, ZUO Shao-hua, et al. Effects of in-situ annealing on the structure and photoluminescence of ZnS thin films prepared by RF sputtering[J]. Journal of infrared and millimeter waves, 2011, 30(6): 507-510.
- [15] 孙常鸿, 张鹏, 张天宁, 等. 硫化锌薄膜的原子层沉积生长及表征[J]. 红外, 2017, 38(2): 1-6.
SUN Chang-hong, ZHANG Peng, ZHANG Tian-ning, et al. Growth and characterization of ZnS thin films by atomic layer deposition[J]. Infrared, 2017, 38(2): 1-6.
- [16] 张蕾, 方龙, 刘攀克, 等. PLD 法在 C 面蓝宝石衬底上制备纤锌矿 ZnS 外延薄膜[J]. 功能材料, 2016, 47(5): 05224-05226.
ZHANG Lei, FANG Long, LIU Pan-ke, et al. Epitaxial growth of wurtzite ZnS thin films on C-plane sapphire substrates by PLD[J]. Journal of functional materials, 2016, 47(5): 05224-05226.
- [17] 宋凌云, 蔡春锋, 刘博智, 等. ZnS 薄膜参数对有机/无机复合发光器件特性的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(4): 888-901.
SONG Lin-yun, CAI Chun-feng, LIU Bo-zhi, et al. Influence of parameters of ZnS film on the organic/inorganic composite luminescence devices[J]. Spectroscopy and spectral analysis, 2014, 34(4): 888-901.
- [18] 朱延技, 张栋, 王长征, 等. (111)择优取向 ZnS 薄膜的

- 制备及特性研究[J]. 人工晶体学报, 2018, 47(8): 1573-1576.
- ZHU Yan-ji, ZHANG Dong, WANG Chang-zheng, et al. Preparation and characteristics of ZnS thin films with (111) preferred orientation[J]. Journal of synthetic crystals, 2018, 47(8): 1573-1576.
- [19] 刘华松, 姜承慧, 李士达, 等. 真空热处理对硫化锌薄膜光学与微结构特性的影响[J]. 光学精密工程, 2017, 25(8): 2038-2045.
- LIU Hua-song, JIANG Cheng-hui, LI Shi-da, et al. Effects of vacuum annealing on optical and microstructure properties of zinc sulfide thin film[J]. Optics and precision engineering, 2017, 25(8): 2038-2045.
- [20] 于天燕, 秦杨, 刘定权. 沉积温度对硫化锌(ZnS)薄膜的结晶和光学特性影响研究[J]. 物理学报, 2013, 62(21): 214211.
- YU Tian-yan, QIN Yang, LIU Ding-quan. Investigation of the crystal and optical properties of ZnS thin films deposited at different temperature[J]. Acta physica sinica, 2013, 62(21): 214211.
- [21] 艾万君, 熊胜明. End-Hall 与 APS 离子源辅助沉积制备的薄膜特性[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1107001.
- AI Wang-jun, XIONG Sheng-ming. Properties of thin films prepared with End-Hall and APS ion assisted deposition [J], Chinese journal of lasers, 2011, 38(11): 1107001.
- [22] 申林, 田俊林, 刘志国, 等. 离子束辅助工艺中 APS 源偏转电压对 HfO_2 薄膜性能的影响[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(1): 118-122.
- SHEN Lin, TIAN Jun-lin, LIU Zhi-guo, et al. Influence of bias voltage of APS ion source on performance of hafnium films deposited with ion-assisted technology[J]. High power laser and particle beams, 2009, 21(1): 118-122.
- [23] ZHANG Yin-hua, XIONG Sheng-ming, HUANG Wei. Determination of refractive index and thickness of YbF_3 thin films deposited at different bias voltages of APS ion source from spectrophotometric methods[J]. Advanced optical technologies, 2018, 7(1-2): 33-37.
- [24] 李凯朋, 王多书, 李晨, 等. 光学薄膜参数测量方法研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 1048-1052.
- LI Kai-peng, WANG Duo-shu, LI Chen, et al. Study on optical thin film parameters measurement method[J]. Infrared and laser engineering, 2015, 44(3): 1048-1052.
- [25] 王多书, 李佑路, 李凯朋, 等. 红外光学薄膜材料折射率温度特性的研究方法[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(4): 040061-040065.
- WANG Duo-shu, LI You-lu, LI Kai-peng, et al. Research method of the temperature characteristic of infrared thin films[J]. Infrared and laser engineering, 2018, 47(4): 040061-040065.
- [26] CHEN Shu-zhen, SONG Li-gang, ZHANG Peng, et al. Influence of low-temperature sulfidation on the structure of ZnS thin films[J]. Chinese physics B, 2019, 28(2): 024214.
- (上接第 108 页)
- [21] 贺海燕. H13 钢表面激光熔覆 Ni 基、Co 基合金粉末的试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- HE Hai-yan. Experimental study on laser cladding properties of Ni-based powders and Co-based powders on the surface of H13 steel[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.
- [22] 毛星. H13 钢耐磨减摩激光熔覆层材料及再制造研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- MAO Xing. Study on laser cladding wear-resistance anti-friction material on H13[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [23] 李亚敏, 咬登治, 范福杰. 激光熔覆 718 合金工艺参数优化的数值模拟研究[J]. 应用激光, 2018, 38(6): 920-926.
- LI Ya-min, YAO Deng-zhi, FAN Fu-jie. Numerical simulation study on process parameters optimization of 718 alloy induced by laser cladding[J]. Applied laser, 2018, 38(6): 920-926.
- [24] 庞铭, 刘全秀. 300 M 钢激光熔覆耐磨防腐自润滑涂层温度场数值模拟研究[J]. 航空材料学报, 2020, 40(2): 35-42.
- PANG Ming, LIU Quan-xiu. Numerical simulation of temperature field of wear-resistant anti-corrosion laser cladding self-lubricating coating on 300 M super-strength steel [J]. Journal of aeronautical materials, 2020, 40(2): 35-42.
- [25] 丁林, 蒋红云. 预热温度对激光熔覆 Co 基合金数值模拟的影响[J]. 南阳理工学院学报, 2013, 5(3): 95-100.
- DING Lin, JIANG Hong-yun. Effect of preheating on numerical simulation of Co based alloys by laser cladding [J]. Journal of Nanyang Institute of Technology, 2013, 5(3): 95-100.
- [26] 许贤博, 邵华. 基于田口算法和灰色关联理论的车削参数多目标优化研究[J]. 工具技术, 2015, 49(8): 15-18.
- XU Xian-bo, SHAO Hua. Multi-object optimization of parameters for turning based on Taguchi method and grey relational analysis[J]. Tool engineering, 2015, 49(8): 15-18.