第 48 卷第 6 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 48，No. 6
2020 年 6 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　June，2020
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.2020.06.20190594

沉积温度、压力对 CVDZnS 晶粒尺寸及性能的影响

魏乃光，郭　立，杨　海，刘晓华，田智瑞，黎建明，李冬旭，蒋立朋，李文江，赵永田，杨建纯

(北京有色金属研究总院有研国晶辉新材料有限公司，河北 三河 065201)

摘　要：通过控制 H_2S 流量(2±1) L/min、氩气流量(35±2) L/min，在不同沉积温度[(650±10)、670±10)、700±10) ℃)]、不同沉积压力[(5 000±200)、7 000±200)、9 000±200) Pa)]工艺条件下采用化学气相沉积法制备出原生 ZnS(CVDZnS)样品。利用 X 射线衍射、金相显微镜、Spectrμm100 Fourier 红外变换光谱仪对 CVDZnS 样品分别进行了物相分析、微观晶粒形貌观察以及 2~15 μm 波段的红外透过率测试。结果表明：CVDZnS 主要以立方相形式存在，有少量六方相，沉积生长的优先取向为 *s*(111)；金相分析表明在沉积压力为(5 000±200)和(7 000±200) Pa 时，随着温度的升高平均晶粒尺寸有增大趋势，最大平均纵向晶粒尺寸值为 15.5 μm。平均纵向晶粒尺寸和平均横向晶粒尺寸的比值越接近“1”，对于提高材料弯曲强度越有利。确定了在沉积温度为(670±10) ℃、沉积压力为(7 000±200) Pa 工艺条件下，制备的 CVDZnS 可以有效提高 2~5、7~10 μm 的平均透过率(~72.15%)，降低 6.0 μm 左右的吸收。

关键词：化学气相沉积硫化锌；沉积温度；沉积压力；光学性能；力学性能
中图分类号：O78　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)06–0925–06
网络出版时间：2020–03–24



Effects of Deposition Temperature and Pressure on Grain Size and Properties of CVDZnS

WEI Naiguang, *GUO Li*, *YANG Hai*, *LIU Xiaohua*, *TIAN Zhirui*, *LI Jiangming*, *LI Dongxu*, *JIANG Lipeng*, *LI Wenjiang*, *ZHAO Yongtian*, *YANG Jianchun*
(GRIRNM Guojing Advanbced Material Co., Ltd., Sanhe 065201, Hebei,China)

Abstract: CVDZnS samples were prepared by a chemical vapor deposition method at different deposition temperatures (*i.e.*, (650±10), (670±10), (700±10) ℃and pressures (*i.e.*, (5 000±200), (7 000±200), (9 000±200) Pa as well as a H_2S flowrate of (2±1) L/min and an argon flowrate of (35±2) L/min. The CVDZnS samples were analyzed by X-ray diffraction, metallographic microscopy and Fourier transform infrared spectroscopy, microscopic grain morphology and infrared transmittance measurement at 2–15 μm. Based on the XRD characterization, CVDZnS mainly exists in the form of cubic phase with a small amount of hexagonal phase and the preferential orientation of deposition growth is *s*(111). The metallographic analysis indicates that the average grain size increases with the increase of temperature when the deposition pressure is (5 000±200) and (7 000±200) Pa, and the maximum average longitudinal grain size is 15.5 μm. The bending strength test data show that the ratio of average longitudinal grain size to average transverse grain size is closer to “1”, which is more advantageous to increase the bending strength of materials. In addition, the CVDZnS prepared at (670±10) ℃ and (7 000±200) Pa can effectively improve the average transmittance of 2–5 and 7–10 μm (*i.e.*, 72.15%) and reduce the absorption at 6.0 μm.

Keywords: chemical vapor deposition of zinc sulfide; deposition temperature; depositional pressure; optical properties; mechanical properties

红外透射材料作为红外探测与制导系统的重要组成材料，其沉积工艺优化以及性能提升一直是研究的热点方向。随着光学技术的发展，刺激了以 ZnS 晶体为首的红外光学材料的研究与开发，ZnS 晶体由于其红外透过率高、抗热冲击性能强、能带隙宽的特点，广泛用作飞行器的窗口、红外吊舱，应用

收稿日期：2019–08–29。　修订日期：2019–12–09。
基金项目：河北省科技重大专项(18041030Z)资助。
第一作者：魏乃光(1980—)，男，教授级高工。
通信作者：郭　立(1991—)，男，工程师。

Received date: 2019–08–29.　**Revised date:** 2019–12–09.
First author: WEI Naiguang (1980–), male, Professor-level senior Engineer.
E-mail: gsq7517@126.com
Correspondent author: GUO Li (1991–), male, Engineer.
E-mail: gsq7517@163.com

在航空领域、武器装备领域以及资源探测领域。自1 970s[1–2]原生 ZnS(CVDZnS)出现以来，由于其卓越的红外光学性能和良好的机械性能，引起了人们极大地兴趣。工业上 CVDZnS 通常利用 H_2S 气体和锌蒸气反应在石墨基板上获得，CVD 工艺的复杂性和不稳定性导致 CVDZnS 出现各种晶体缺陷[3–5]。ZnS 主要有两种结构类型：闪锌矿(立方相)和纤锌矿(六方相)[6–7]。在 CVDZnS 中纤锌矿是一种不需要的晶相结构，它会引起散射，降低红外透射率。除了这两种稳定的结构外，研究人员还报告了大约 194 种多晶型 ZnS 结构[8]，这些多晶型结构是由于二维“模块层”的反复堆叠而形成的稳定的过渡相[9–10]。杨海等[11]报道了 CVDZnS 胞状生长现象对材料结构与性能的影响，分析得出胞状生长现象能改变 CVDZnS 材料内部的晶粒生长方向、分布方式，但对材料内部的物相、元素分布并未造成显著影响，此外他们还报道了在沉积生长初期异常大晶粒的形成机理，并且确定异常大晶粒再结晶的优先取向是 *s*(111)[12]。憨勇等[13]分析了 CVDZnS 中与锌有关的晶体缺陷及其对光学性能的影响，指出 Zn–H 的存在会降低 6.0 μm 左右的吸收，对光学性能产生极其不利的影响；然而当前相关研究学者对 CVDZnS 的光学性能与力学性能的研究，仅仅从微观缺陷形成以及杂质相存在的角度去研究其对性能的影响[14–16]，却没有考虑从沉积工艺的角度去提升 CVDZnS 性能。

通过开展不同沉积工艺实验，一方面研究沉积温度以及沉积压力对 CVDZnS 晶粒尺寸、光学性能以及力学性能的影响，优化沉积工艺，确定生长高质量 CVDZnS 的工艺方案；另一方面，通过开展沉积工艺对 CVDZnS 性能影响研究，能够为生产上提供科学的方法去解决 CVDZnS 6.0 μm 左右吸收大、杂质相多等问题，降低因消除 CVDZnS 缺陷而带来的后续生产成本。

1 实验

1.1 CVDZnS 沉积实验

采用化学气相沉积法制备 CVDZnS，使用 Zn(纯度为 99.999%和 H_2S(纯度为 99.99%)气体作为初始原料，控制沉积温度为 650~700 ℃，沉积温度偏差为 20~30 ℃，沉积压力为 5 000~9 000 Pa，沉积压力偏差为 2 000 Pa，H_2S 流量(2±1) L/min，氩气流量(35±2) L/min，CVDZnS 沉积工艺参数如表 1 所示。CVDZnS 反应原理如下式：

$$Zn(g)+H_2S(g)=ZnS(s)\downarrow+H_2(g)$$

沉积主产物 ZnS 吸附于衬底表面，并逐步沉积生长成为 CVDZnS，副产物 H_2 返回主气流，并随尾气排出炉外。

表 1 CVDZnS 沉积工艺参数

Table 1 Deposition process parameters of CVDZnS

Sample No.	Deposition temperature/℃	Deposition pressure/Pa	H_2S flow/(L·min^{-1})	Ar flow/(L·min^{-1})
A	650±10	5 000±200	2±1	35±2
B	670±10	5 000±200	2±1	35±2
C	700±10	5 000±200	2±1	35±2
D	650±10	7 000±200	2±1	35±2
E	670±10	7 000±200	2±1	35±2
F	700±10	7 000±200	2±1	35±2
G	650±10	9 000±200	2±1	35±2
H	670±10	9 000±200	2±1	35±2
I	700±10	9 000±200	2±1	35±2

将不同沉积温度、沉积压力下制备出的 CVDZnS 经切割、粗磨、细磨、抛光等工艺加工至表面光洁度 R_a=0.08 μm 的 ϕ35×4 mm 的样品，如图 1。

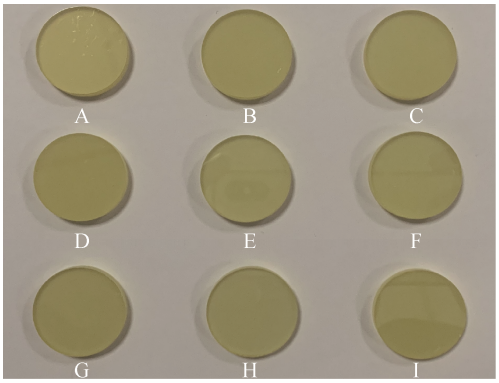


图 1 不同工艺下制备的 CVDZnS 经加工制成的 9 块样品

Fig. 1 9 CVDZnS samples prepared by different processes

1.2 材料性能测试

采用 Rigaku 公司钴靶 X 射线衍射仪进行 XRD 分析，扫描角度为 10°~80°，扫描步长 0.02。采用 11XD-PC 型倒置金相显微镜表征晶体微观形态，首先将样品在 90 ℃进行表面腐蚀操作，腐蚀液为 1:1 配比的 15%$K_3Fe(CN)_6$ 溶液与 15%KOH 溶液，腐蚀时间 15 min。采用 Perkin Elmer LR-64912C Fourier 红外光谱仪测试样品在 2~15 μm 的光学透过率。依据国标 GB/T 6569—2006，采用三点弯曲法测试弯曲强度，样品 3 mm×4 mm×36 mm，长边倒角 45°，表面抛光至 0.08 μm 表面光洁度。

3 结果与讨论

3.1 CVDZnS 结构分析

利用 X 射线衍射对不同沉积工艺下制备的

CVDZnS进行物相和晶体结构分析，晶面符号前“*w*”表示六方相，晶面符号前“*s*”表示立方相[17]，测试结果如图 2。从图 2 可以看出，CVDZnS 主要由立方相和少量六方相组成，样品 A~样品 I 在 32.86°的 *s*(111)衍射峰强度和 55.38°的 *s*(220)衍射峰基本无变化，在沉积压力不变时随着沉积温度升高样品 A~样品 C 在 55.38°的 *s*(220)衍射峰强度有增强的趋势，而 66.1°的 *s*(311)衍射峰强度有减弱的趋势，出现“此高彼低”互补现象；然而随着沉积温度升高，样品 D~样品 F 与样品 G~样品 I 在 55.38°的 *s*(220)衍射峰强度有减弱的趋势，在 66.1°的 *s*(311)衍射峰强度有增强的趋势，出现“此低彼高”互补现象，造成这种现象的原因，推测可能是由于沉积温度的变化导致沉积速率不均匀，间接造成 CVDZnS 晶粒平均尺寸增大或减小，从而出现 CVDZnS 晶粒有沿着优势晶面生长的趋势。随着沉积温度的升高，在沉积压力为(5 000±200)、(7 000±200) Pa 时沉积生长优先取向依次为 *s*(111)、*s*(200)，在沉积压力为(9 000±200) Pa 时沉积生长优先取向依次为 *s*(111)、*s*(311)。此外，许多文献[18–19]报道六方相与立方相在 1 020 ℃时为平衡态，可相互转化，1 020 ℃以下为立方相的稳定区间，在温度远低于稳定温度情况下，六方相属不稳定状态。在 30.54°处可以观察到微弱 *w*(100)衍射峰，对于样品 A~样品 I 沉积压力不变时，随着沉积温度的升高，沉积温度为已生成的且处于不稳定态的六方相提供了向立方相转变的热动力学条件，因此可以观察到样品 A~样品 I XRD 谱中 *w*(100)衍射峰有减弱的趋势，对此可以得出提高沉积温度有助于抑制六方相的生成。

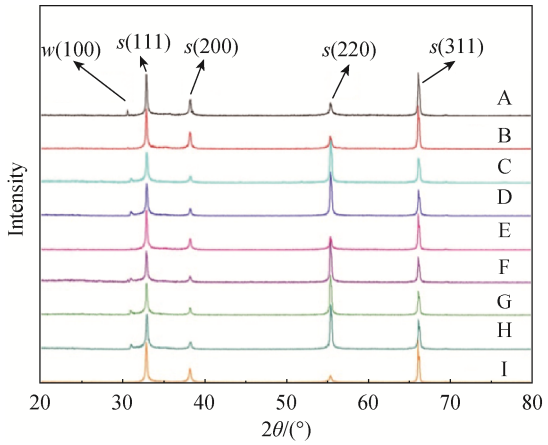


图 2　不同沉积工艺下制备的块状 CVDZnS 的 XRD 谱

Fig. 2　XRD of bulk CVDZnS prepared by different deposition processes

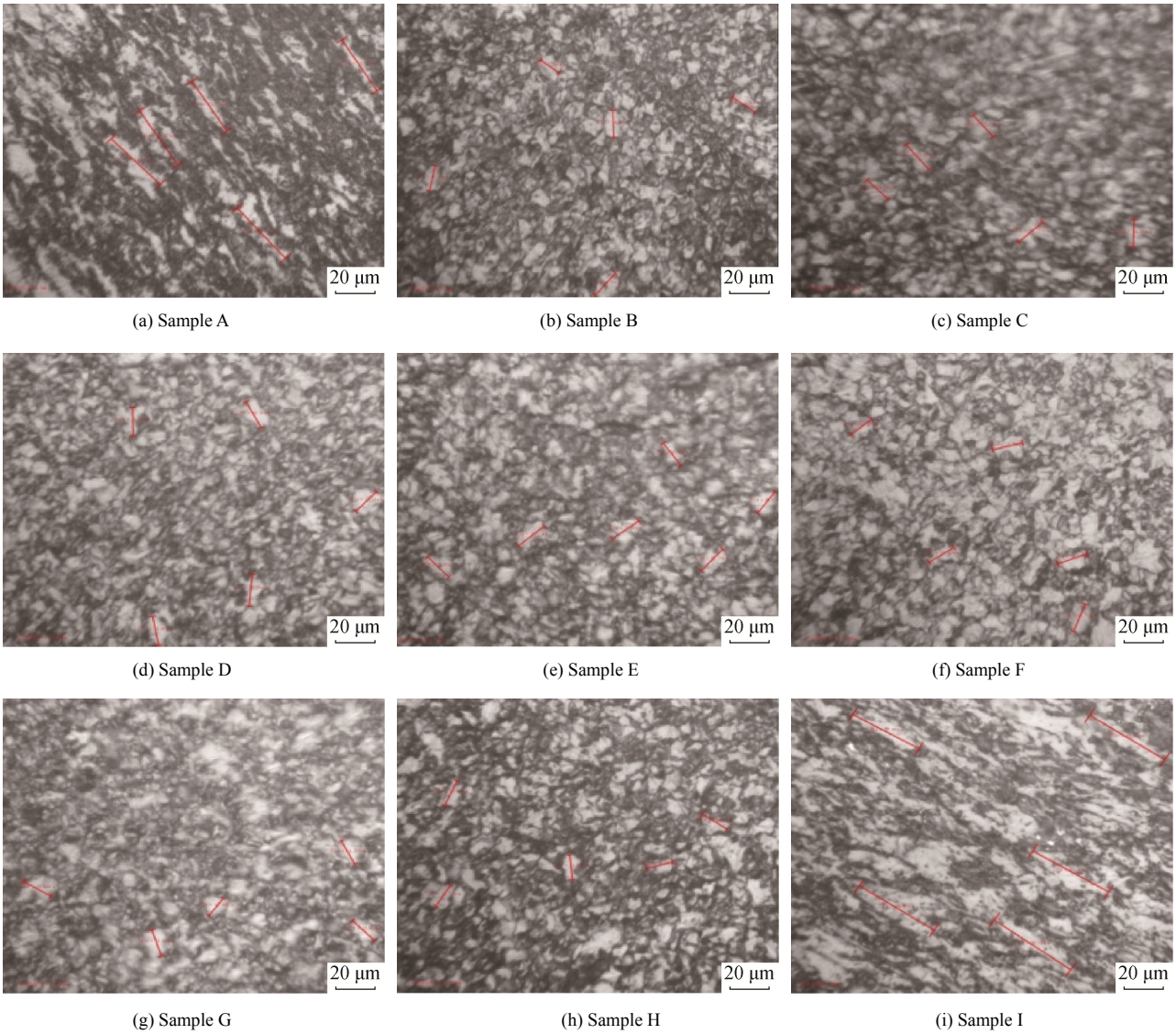
3.2　沉积温度、压力对 CVDZnS 晶粒尺寸的影响

图 3 为样品 A~样品 I 通过金相显微镜观察得到的金相图片，经观察计算样品 A~样品 I 的晶粒尺寸大小如表 2。从图 4 可知，在沉积压力不变时样品 B、样品 C 与样品 D、样品 E 表现出平均横向晶粒尺寸变大的趋势，当沉积温度为(670±10) ℃、沉积压力为(7 000±200) Pa 时，平均横向晶粒尺寸达到最大值，此时平均横向晶粒尺寸为 16.39 μm，而样品 B~样品 E 表现出的平均纵向晶粒尺寸变大趋势较为明显，同样是当沉积温度为(670±10) ℃、沉积压力为(7 000±200) Pa 时，平均纵向晶粒尺寸达到最大值，此时平均纵向晶粒尺寸为 15.5 μm。对于样品 B、样品 E、样品 G，当沉积温度为(670±10) ℃时，随着沉积压力的增大 CVDZnS 的平均横向和纵向晶粒尺寸都表现出先升高再降低的趋势；对于样品 C、样品 F、样品 I，当沉积温度(700±10) ℃时，随着沉积压力的增大 CVDZnS 的平均横向和纵向晶粒尺寸也表现出先升高再降低的趋势。此外，从图 4 也可以看出，当沉积温度超过(670±10) ℃、沉积压力超过(7 000±200) Pa 时，样品 F~样品 H 的平均横向晶粒尺寸和平均纵向晶粒尺寸也都呈现下降的趋势。当沉积压力为(5 000±200)和(7 000±200) Pa 时，随着温度的升高平均晶粒尺寸发生着变化，呈增大趋势，推测晶粒形状由“棒状”向“球状”演化。

3.3　沉积温度、压力对 CVDZnS 光学性能的影响

图 5 为不同沉积工艺制备的 CVDZnS 的红外透过率测试曲线，图 5a 为 2~15 μm 的红外透过率。由图 5a 可以看出，样品 E 在 2~5 和 7~10 μm 波段范围内，其红外透过率曲线波动幅度较小，趋于平稳；而其余几个样品在 2~5 和 7~10 μm 波段范围内均呈现上升趋势。图 5b 为样品 A~样品 I 在 6 μm 左右的红外透过率曲线，从图 5b 可以看到，样品 A~样品 I 在 6.02 μm 出现了不同程度的吸收峰，文献[20–21]中报道 CVDZnS 在 6.02 μm 处出现吸收是由于副产物氢占据了 S 空位而与 Zn 结合成 Zn—H 键造成的。尽管样品 E 在 6.02 μm 处吸收峰已明显降低，在 5.85 μm 处却出现微小的吸收，造成这种吸收现象的原因可能是由于 CVDZnS 非化学计量配比间接造成 Zn、S 两个原子间偶极矩发生变化而造成的。此外，从图 5a 可以观察到，在沉积压力不变时，样品 A~样品 C、样品 D~样品 E、样品 F~样品 I 在 2~ 15 μm 范围内，随着温度的升高样品的红外透过率有升高趋势；在沉积温度不变时，样品 A、样品 D、样品 G，样品 B、样品 E、样品 H 与样品 C、样品 F、样品 I 在 2~15 μm 范围内，随着沉积压力的变化，

样品 A~I 的红外透过率没有发现规律性的变化趋势。因此，推测可能是在沉积过程中，沉积温度影响材料微观晶粒尺寸间接影响材料光学性能所导致。



(a) Sample A (b) Sample B (c) Sample C

(d) Sample D (e) Sample E (f) Sample F

(g) Sample G (h) Sample H (i) Sample I

图 3 不同沉积工艺下制备的 CVDZnS 金相图片

Fig. 3 Metallographic pictures of CVDZnS prepared by different deposition processes

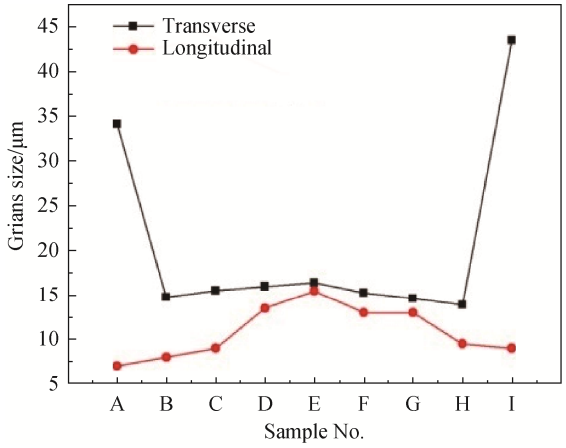


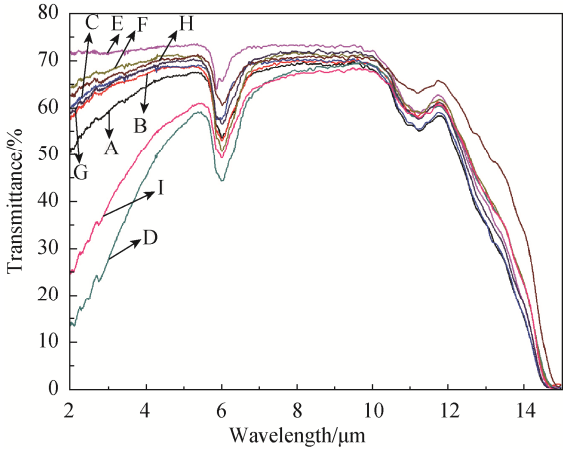
图 4 样品 A~样品 I 的平均晶粒尺寸变化曲线

Fig. 4 Average grain size change curve of samples with A~I

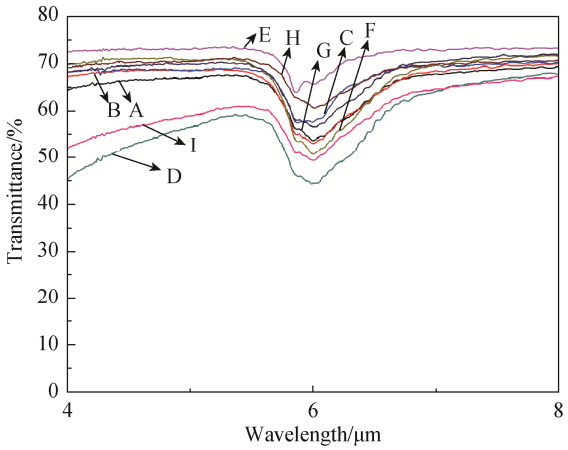
表 2 样品 A~样品 I 的晶粒尺寸

Table 2 Grain size of samples A–I

Sample No.	Average transverse size/μm	Average longitudinal size/μm
A	34.14	7.0
B	14.79	8.0
C	15.54	9.0
D	15.99	13.5
E	16.39	15.5
F	15.26	13.0
G	14.65	13.0
H	13.87	9.5
I	43.49	9.0



(a) 2–15 μm



(b) 4–8 μm

图 5　不同沉积工艺下制备的 CVDZnS 的红外透过率

Fig. 5　Infrared transmittance of CVDZnS prepared by different deposition processes

结合图 3 和图 4 分析得知，随着温度的变化样品 A~样品 E 的平均纵向晶粒尺寸和平均横向晶粒尺寸的比值逐渐趋于“1”，样品 E 的平均纵向晶粒尺寸和平均横向晶粒尺寸的比值为 0.95，而样品 E~样品 I 的平均纵向晶粒尺寸和平均横向晶粒尺寸的比值从 0.95 变为 0.21，表明样品 A~样品 I 的晶粒尺寸的形状从“棒状”向“球状”再到“棒状”演化，从而说明沉积温度通过影响材料微观晶粒尺寸大小和形状来影响材料的透过率。

3.4　沉积温度、压力对 CVDZnS 力学性能的影响

样品 A~样品 I 的弯曲强度测试结果如表 3 所示，图 6 为样品 A~样品 I 的弯曲强度值分布。样品 A~样品 I 的弯曲强度值变化幅度较大，最大值为 121 MPa，最小值为 103 MPa，说明沉积工艺对材料材料的力学性能较大。在沉积压力不变时，对于样品 A~样品 G 随着温度的升高，材料的弯曲强度先升高再降低；在沉积温度不变时，样品 A、样品 D、样品 G，样品 B、样品 E、样品 H 与样品 C、样品 F、样品 I 的弯曲强度值均有先升高后降低的趋势，这一变化趋势与晶粒尺寸的形状从“棒状”向“球状”再到“棒状”演化是有关系的，平均纵向晶粒尺寸和平均横向晶粒尺寸的比值越接近“1”，对材料的弯曲强度越有利。因此，样品 A~样品 I 的弯曲强度先升高后降低的变化趋势是沉积温度和沉积压力双重因素作用下的结果，于是得出在沉积温度为 650±10 ℃、沉积压力为 7 000±200 Pa 时弯曲强度达到最大值 121 MPa。

表 3　CVDZnS 样品弯曲强度测试结果

Table 3　Test results of bending strength of CVDZnS samples

Sample No.	Width/ mm	Thick-ness/ mm	Span/ mm	Critical load/ MPa	Bending strength/MPa
A	3.897	2.880	30	76.83	107
B	4.113	2.913	30	89.01	115
C	3.839	3.097	30	94.06	115
D	3.779	2.938	30	87.81	121
E	3.816	2.893	30	82.26	116
F	3.838	3.032	30	89.80	115
G	3.897	3.065	30	83.56	103
H	3.792	3.110	30	95.89	118
I	4.098	3.002	30	86.98	106

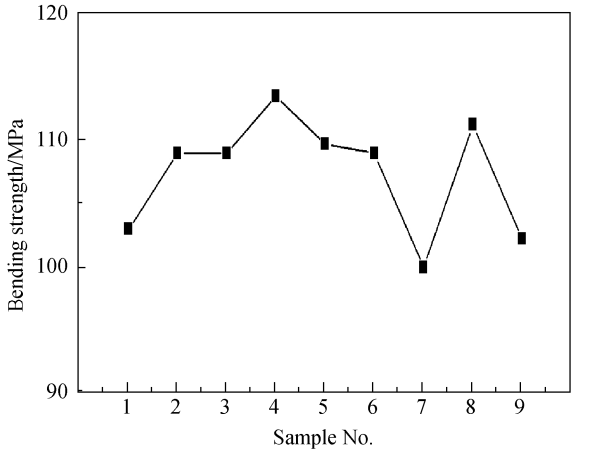


图 6　不同沉积工艺下制备的 CVDZnS 弯曲强度值分布图

Fig. 6　Distribution of bending strength value of CVDZnS prepared by different deposition processes

4　结论

CVDZnS 主要以立方相形式存在，有少量六方相，并且 CVDZnS 优先生长面为 *s*(111)。样品 B~H 的平均横向晶粒尺寸变化幅度较小，平均纵向晶粒尺寸呈现先增大后减小的趋势，最大平均纵向晶粒尺寸值为 15.5 μm，并得出在沉积温度为(670±10) ℃、沉积压力为(7 000±200) Pa 时平均横向晶粒尺寸值

与平均纵向晶粒尺寸值最接近。在沉积温度为 670±10 ℃、沉积压力为(7 000±200) Pa 的工艺条件下制备的 CVDZnS 可以有效提高 CVDZnS 在 2~5 μm 和 7~10 μm 的平均透过率和降低 6.0 μm 左右的吸收。平均纵向晶粒尺寸和平均横向晶粒尺寸的比值越接近“1”，对于提高材料弯曲强度越有利。通过以上工艺实验分析得出，在 H_2S 流量(2±1) L/min，氩气流量(35±2) L/min 不变的条件下，控制沉积温度为(670±10) ℃、沉积压力为(7 000±200) Pa 可以降低 6.0 μm 左右吸收，控制 CVDZnS 沉积晶粒尺寸，提高光学性能和力学性能。

参考文献:

[1] 余怀之. 红外光学材料第二版[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 287–296.

[2] KLEIN C A, DONADIO R N. Infrared-active phonons in cubic zinc sulfide[J]. J Appl Phys, 1980, 51:797–800.

[3] ZSCHECKEL T, WISNIEWSHI W, RUSSEL C. Microstructure and texture of polycrystalline CVD-ZnS analyzed via EBSD[J]. Adv Funct Mater, 2012, 22: 4969–4974.

[4] MCCLOY J S, RALPH K, ZELINSKI B, et al. Effects of temperature, pressure, and metal promoter on the recrystallized structure and optical transmission of chemical vapor deposited zinc sulfide[J]. J Am Ceram Soc, 2009, 92(8): 1725–1731.

[5] 杨德雨, 杨海, 李红卫, 等. 化学气相沉积制备块体 ZnS 缺陷综述[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(S1): 15–19.
YANG Deyu, YANG Hai, LI Hongwei, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2017, 36(S1): 15–19.

[6] MCCLOY J S, KORENSTEIN R. Variability in chemical vapor deposited zinc sulfide: Assessment of legacy and international CVD ZnS materials[J] Proceedings of SPIE–The International Society for Optical Engineering, Washington, America, 2009, 7302, 73020M: 1–5.

[7] HARRIS D. Development of Hot-Pressed and Chemical-Vapor-Deposited Zinc Sulfide and Zinc Selenide in the United States for Optical Windows[C] // Optical Fabrication & Testing: Optical Society of America, Washington, America, 2008, 4: 220–221.

[8] SHCHUROV A F, GAVRISHCHUK E M, IKONNIKOV V. B, et al. Effect of hot isostatic pressing on the elastic and optical properties of polycrystalline CVDZnS[J]. Inorg Mater, 2004, 40: 336–339.

[9] MCCLOY J S, WOLF W, WIMMER E, et al. Impact of hydrogen and oxygen defects on the lattice parameter of chemical vapor deposited zinc sulfide[J]. J Appl Phys, 2013, 113(2): 023706.

[10] 杨海, 霍承松, 余怀之, 等. 红外用 CVDZnS 多晶材料的研制[J]. 应用光学, 2008, 29(1): 57–61.
YANG Hai, HUO Chengsong, YU Huaizhi, et al. Appl Opt (in Chinese), 2008, 29(1): 57–61.

[11] 杨海, 魏乃光, 郭立, 等. CVD-ZnS 胞状生长现象对材料结构与性能的影响[J].人工晶体学报, 2019, 249(7): 1233–1239.
YANG Hai, WEI Naiguang, GUO Li, et al. J Synth Cryst (in Chinese), 2019, 249(7): 1233–1239.

[12] WEI Naiguang, YANG Hai, GUO Li, et al. Recrystallization mechanism of abnormal large grains during long growth of CVD-ZnS[J]. J Cryst Growth. 2019, 517: 48–53.

[13] 憨勇, 吴慧卓, 刘正堂, 等. CVD-ZnS 中与锌有关的晶体缺陷及其对光学性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 1997, 25(4): 447–451.
HAN Yong, WU Huizhuo, LIU Zhengtang, et al. J Chin Ceram Soc, 1997, 25(4): 447–451.

[14] ZSCHECKEL T, WISNIEWSHI W, GEBHARDT A, et al. Mechanisms Counteracting the Growth of Large Grains in Industrial ZnS Grown by Chemical Vapor Deposition[J]. ACS Appl Mater Interf, 2014, 6(1): 394–400.

[15] CHENG C, FEI J D. Numerical simulation on the optical transmission distortions throughout the laminar flow field[J]. Infr Laser Eng, 2005, 34: 548–552.

[16] POTTER R F. Chemically Vapor-Deposited Zinc Sulfide Infrared Windows: Optical Properties And Physical Characteristics[C] // Physical Properties of Optical Materials: International Society for Optics and Photonics, Washington, America, 1980: 23–25

[17] RAMMAVAT P, BISWAS P, KUMAR R S, et al. Effect of sphalerite to wurtzite crystallographic transformation on microstructure, optical and mechanical properties of zinc sulphide ceramics[J]. Ceram Inter, 2011, 37(3): 1039–1046.

[18] DREZENER Y, BERGER S, HEFETZ M. A correlation between microstructure, composition and optical transparency of CVD-ZnS[J]. Mater Sci Eng B, 2001, 87(1): 59–65.

[19] MCCLOY J S, TUSTISON R W. Chemical vapor deposited zinc sulfide[M]. Washington: SPIE, 2013: 74–75.

[20] LEWIS K L, ARTHUR G S, STEPHEN A B. Hydrogen-related defects in vapour-deposited zinc sulphide[J]. J Cryst Growth, 1984, 66: 125–136.

[21] MYERS S M, BASKES M I, BIMBAUM H K, et al. Hydrogen interactions with defects in crystalline solids[J]. Rev Mod Phys, 1992, 64(2): 559–617.

※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※



魏乃光，有研国晶辉新材料有限公司副总经理，正高级工程师。先后主持和参与国家“863”重点项目、国防“973”项目及其他科研课题 10 项。在国内外学术刊物上发表研究论文 11 篇，申请专利 10 项，授权专利 6 项，其中发明专利 3 项。主要研究方向为 CVD ZnS、CVD ZnSe、红外锗单晶、硫系玻璃、蓝宝石等红外光学材料。



郭立，有研国晶辉新材料有限公司员工，工程师，主要从事 CVD ZnS、CVD ZnSe 红外光学材料研究与开发。所在单位研究开发项目包括 CVD ZnS、CVD ZnSe、硫系玻璃等红外光学材料的制备、加工与镀膜，以及光纤用高纯化学品的制备。