

文章编号: 1672-8785(2012)11-0001-07

透红外晶体材料的研究现状

熊远鹏 吴 波 温翠莲 王 敏 黄超然 刘海龙

(福州大学材料科学与工程学院, 福建 福州 350108)

摘 要: 透红外晶体材料由于具有优异的红外光学性能, 已被广泛应用于红外窗口和整流罩等方面。简要概述了透红外晶体材料的性能要求及其对透红外晶体材料发展的意义。以性能优异为指标, 梳理了国内外关于透红外晶体材料的研究现状。最后展望了透红外晶体材料的发展趋势。

关键词: 透红外; 晶体材料; 窗口; 整流罩

中图分类号: O78 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2012.11.001

Current Status of Infrared Transmission Crystal Materials

XIONG Yuan-peng, WU Bo, WEN Cui-lian, WANG Min, HUANG Chao-ran, LIU Hai-long

(School of Materials Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Because of excellent infrared optical properties, infrared transmission crystal materials are widely used in both the military field and the civil field. The property requirements of infrared transmission crystal materials and their significance are presented in brief. By taking the excellent property as a precondition, the current research status of the infrared transmission crystal materials at home and abroad is presented. Finally, the trend of the infrared transmission crystal materials is forecasted.

Key words: transmission infrared; crystal material; window; dome

0 引言

透红外材料是指能够允许某一特定波长范围内的红外线穿过, 而且不产生吸收和辐射的材料, 主要包括透红外晶体材料和透红外玻璃材料^[1]。作为红外技术中的关键材料, 透红外材料主要用于红外探测器和飞行器的窗口、整流罩等。由于这些材料的应用环境日益苛刻, 比如材料经常受到风沙、雨水以及热冲击的影响, 特别是近年来隐身技术和反导技术的不断发展, 人们对透红外材料的耐热冲击性能、硬度和强度等方面都提出了更高的要求。其中, 透红外玻璃材料虽然具有优异的光学性能和优良的加工

性能, 但是其耐高温性能差、强度弱等因素限制了它在窗口和整流罩材料中的应用和发展, 而透红外晶体材料在这些方面的性能远远优于透红外玻璃材料^[1]。为此, 我们有必要对透红外晶体材料的研究现状及发展趋势进行探讨。

1 透红外晶体材料的性能

透红外晶体材料主要用于红外窗口和整流罩等。该材料性能的优劣主要是从光学性能、力学性能、热学性能、热冲击抗力、雨蚀抗力和固体颗粒冲击抗力等几个方面判断的。因此, 这些性能的评价结果对保证材料的综合性能具有非

收稿日期: 2012-10-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50971043; 51171046)

作者简介: 熊远鹏 (1989-), 男, 江西赣州人, 硕士, 主要从事无机功能材料研究。 E-mail: jcjxcn02@163.com

常重要的意义。

1.1 光学性能

透红外晶体材料的光学性能一般是根据材料的红外透过率和折射率评价的^[2]。就材料的红外透过率而言,无论哪一种透红外晶体材料,其红外透过率越高,相应的光学性能就越好。例如,专门用于长波波段的红外窗口材料应该在长波红外波段具有高透过率;从折射率的角度来看,对于用于红外窗口和整流罩的材料,降低材料的折射率,有助于减少红外线的反射和散射损失,提高材料的红外透过率。

1.2 力学性能

透红外晶体材料的力学性能主要是指材料的强度和硬度。材料的强度和硬度越大,相应的力学性能越好。一般可采用努普硬度、弯曲强度、断裂韧性、断裂模量以及杨氏模量等参量进行表征。而这些参量的大小与材料内部晶粒的大小密切相关。晶粒的尺寸越大,材料的光学性能越好,但其力学性能会逐渐变差^[3]。

1.3 热学性能与热冲击抗力

对于透红外晶体材料的热学性能来说,最好的表征参量是材料的熔点。目前,由于飞机和导弹的飞行速度变得越来越快,由透红外晶体材料制备的红外窗口和整流罩在高速飞行时会与空气发生摩擦而产生大量热量。此时,如果材料的热学性能差,即熔点低,那么材料极易被熔化,导致红外透过率降低,并对飞行器构成安全隐患。此外,材料与空气摩擦产生的大量热量,会使材料的内外表面形成温度梯度,产生热应力。这时,内表面会受到拉应力的作用^[2],使材料的热冲击抗力降低,造成材料破裂。材料的热冲击抗力一般可由抗热冲击品质因子 R 表示^[4]:

$$R = K\delta(1 - \gamma)/E\alpha \quad (1)$$

式中, K 为热导率; δ 为断裂模量; γ 为泊松比; E 为杨氏模量; α 为线膨胀系数。

由式(1)可知,通过提高材料的热导率及断裂模量,降低线膨胀系数,能够提升材料的抗热冲击性能。

1.4 雨蚀抗力

雨蚀抗力是指透红外晶体材料抵抗风雨冲击的能力。由于红外窗口和整流罩材料受到雨滴冲击时会发生弹性变形,由冲击引起的拉伸脉冲与材料在抛光时形成的细微表面会产生损伤作用,形成环形裂纹^[5]。这样会降低材料的雨蚀抗力,影响材料的红外透过率。材料的雨蚀抗力可以用雨滴冲击速率阈值 V_c 来表征^[5]:

$$V_c^3 = AK_{1c}^2 C_R d^{-1} \rho^{-2} \quad (2)$$

式中, A 为与材料无关的常数; K_{1c} 为材料的断裂韧性参数; C_R 为雨滴冲击时产生的 Rayleigh 波速,取决于材料的泊松比; ρ 和 d 分别为雨滴的密度和直径, $\rho=1/(g/cm^3)$ 。

当雨滴的冲击速率超过 V_c ,即超过材料的雨蚀抗力时,材料表面开始形成微裂纹。由式(2)可知,通过提高材料的断裂韧性,可以使速率阈值 V_c 增大,材料的雨蚀抗力也会相应增强。

1.5 固体颗粒冲击抗力

透红外晶体材料的固体颗粒冲击抗力可由颗粒冲击速率临界值 V_c 来表征。研究人员认为,当固体颗粒冲击速率超过临界值 V_c 时,就会开始形成裂纹^[2],导致材料的红外透过率降低:

$$V_c = \lambda K_{1c}^3 H^{-5/2} m^{-1/2} \quad (3)$$

式中, λ 为与材料无关的常数; K_{1c} 为材料的断裂韧性参数; H 为材料的硬度; m 为冲击颗粒的质量。

由式(3)可知,提高材料的断裂韧性和降低材料的硬度,有助于提高材料的固体颗粒冲击抗力。表1列出了目前几种主要透红外晶体材料的基本性能。

综上所述,就透红外晶体材料而言,提高红外透过率是材料制备发展的最终目标。但随着应用环境的日益苛刻,材料的力学、热学、热冲击抗力、雨蚀抗力和固体颗粒冲击抗力等因素对透红外晶体材料的光学性能的影响变得越来越明显。性能优异的透红外晶体材料不仅要有良好的红外透过率,而且更应具有良好的强度、硬度、抗热冲击力、抗侵蚀力和耐高温等性能。

表 1 几种主要透红外晶体材料的物理性能

材料	折射率	硬度 (MPa)	光谱 (μm)	熔点 ($^{\circ}\text{C}$)	密度 (g/cm^3)
氟化镁	1.34	610	0.7 ~ 9	1255	3.18
硫化锌	2.2	250	0.6 ~ 13	1830	4.09
硒化锌	2.41	120	0.5 ~ 20	1520	5.27
尖晶石	1.71	1600	0.2 ~ 6	2135	3.58
金刚石	2.38	9000	7 ~ 15	3770	3.52
蓝宝石	1.62	1600 ~ 2200	0.4 ~ 6	2050	3.98

2 国内外研究现状

目前用于红外窗口和整流罩的透红外晶体材料主要有金刚石、硒化锌、硫化锌、氟化镁、尖晶石和蓝宝石等。下面分别对其进行介绍。

2.1 金刚石

金刚石一般采用化学汽相沉积 (Chemical Vapor Deposition, CVD) 法制备。采用 CVD 法制备的金刚石在红外透过率上能够与天然级别的 II a 金刚石相媲美, 但其强度比天然金刚石低。2003 年, 美国 Raytheon 公司生长的最大金刚石窗口的尺寸达到 $\Phi 120 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$, 整流罩达到 $\Phi 70 \text{ mm}$, 厚度为 0.7 mm [6]。

作为长波红外窗口和整流罩的材料, 金刚石的折射率高, 对红外线的反射、散射损失大, 所以其实际的红外透过率较低, 大约在 60% 左右。从工作环境温度来看, 红外窗口材料和整流罩材料需要在 $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的温度下使用, 但金刚石在高于 $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时就会出现氧化。此时, 通过吸附氧, 它会形成 CO 、 CO_2 或转变成石墨, 导致表面粗糙, 红外透过率降低。金刚石的抗热冲击力也降低。随着红外窗口和整流罩应用环境的日趋恶劣, 人们对金刚石的力学和热学性能提出了更高的要求。此外, 金刚石内部的声子热运动会产生吸收。Kelin C A [7] 对金刚石红外窗口和整流罩的力学和热学性能进行了相应的评价, 得出金刚石材料具有良好的力学和热学性能的结论。Davies A R 等人 [8] 对金刚石表面进行了固体颗粒冲击腐蚀。当裂纹起源于形核表面时, 金刚石的强度与厚度无关。同时, 通

过提高金刚石晶体的生长速度可以发现, 金刚石表面的微裂纹对金刚石强度的影响比金刚石内部裂纹的小。Worner 等人 [9] 采用激光量热技术研究了金刚石红外吸收系数随温度的变化情况。结果表明, 随着温度的不断增加, 金刚石的红外吸收系数逐渐增加。Kubarev V V [10] 采用气体激光方法测量了金刚石的透射光谱, 采用傅里叶光谱技术研究了其频率变化矩阵, 并采用量热方法测量了其吸收系数。结果表明, 金刚石透射光谱的红外损失低于 0.5%。McGeoch S P 等人 [11] 通过在金刚石表面镀制 AlN 薄膜, 明显提高了金刚石的使用温度 (达到 $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$)。然而, 金刚石自身的高硬度导致金刚石材料在机械加工上存在困难。陈荣发等人 [12] 就抛光后的光学级金刚石薄膜的表面缺陷对红外性能的影响进行了研究。他们发现, 金刚石薄膜内部微裂纹的尺寸和深度不同, 会引起入射光波在裂纹表面和内部产生不同程度的散射和吸收, 造成红外透过率降低。从目前的研究报道来看, 国外已经能够制备大尺寸的块体。例如, 美国 Raytheon 公司能够生产最大尺寸达 $\Phi 120 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 的金刚石窗口和 $\Phi 70 \text{ mm}$ 、厚 0.7 mm 的整流罩 [12]。而国内目前最需要解决的问题就是如何生长制备出光学级金刚石整流罩和红外窗口。

2.2 氟化镁 MgF_2

MgF_2 主要采用热压法制备。热压 MgF_2 具有机械强度高和耐化学腐蚀性能好等特点。由于热压法对杂质的提纯效果较差, MgF_2 内部残留的散射颗粒和杂质会严重影响材料的红外透过率 [13], 而材料内部残留的杂质与原料的合成

工艺密切相关。王璐璐等人^[14]采用液相中合法对制备的 MgF_2 高纯粉末进行了热压烧结,发现粉末的合成工艺和技术参数对 MgF_2 的红外透过率有较大影响。Chang C S 等人^[15]研究了热压氟化镁的晶粒尺寸和孔隙对其透红外性能的影响。他们认为,晶粒尺寸越小,孔隙率越低,其透红外性能就越好。为提高 MgF_2 材料的致密度,研究人员采取提高温度的方法来增加材料的致密度。但据相关国外文献报道,随着温度的增加, MgF_2 材料的孔隙率也会增加。为此, Nofar M 等人^[16]进一步研究了热压工艺对 MgF_2 材料的致密度、微观结构以及透红外性能的影响。他们发现,通过增加热压温度和压力能够提高 MgF_2 材料的红外透过性能,而且 MgF_2 材料对红外线的吸收及散射与内部的孔隙密切相关。图 1 所示为中非人工晶体研究院制作的氟化镁单晶整流罩。由于受到硬度与抗热冲击性因素的限制, MgF_2 只能在速度低于 2 马赫的飞行器中使用。如何提高 MgF_2 的硬度及抗热冲击性是目前人们需要解决的主要问题^[17]。



图 1 MgF_2 单晶整流罩

2.3 硫化锌 ZnS

ZnS 有闪锌矿和纤锌矿两种结构,其转变温度为 $1020\text{ }^\circ\text{C}$ 。用于透红外材料的主要是闪锌矿结构的 ZnS,它是长波红外窗口和整流罩中的重要材料^[18]。

闪锌矿 ZnS 主要采用热压法和化学汽相法制备。用热压法制备的闪锌矿 ZnS 具有优异的固体颗粒冲击抗力和力学性能,而且生产成本低。在 2007 年举行的人与车科技展中,日本住友电气工业公司实现了采用硫化锌烧结晶作为远红外相机镜头的模块,极大地降低了材料的生产

成本^[19]。但由于 Zn-S 之间的离子键成分, ZnS 烧结容易产生挥发现象。在熔点 $1830\text{ }^\circ\text{C}$ 下,当蒸汽压达到 0.4 MPa 时,很难采用热压法获得大尺寸的 ZnS 单晶材料。

热压工艺的主要缺陷是对杂质的提纯效果较差。ZnS 晶体内部残留的杂质不可避免地会降低 ZnS 的红外透过率。在用热压法制备 ZnS 时,研究人员关注的主要是对原料提纯及热压工艺进行控制。Block B 等人^[20]研究发现, ZnS 材料内部的空隙是在烧结过程中由未能释放出的空气所致,它会导致回弹效应不利于致密化,并使晶体在烧结时产生裂纹;孔隙的压力是减压烧结的关键因素。用化学汽相法制备的 ZnS 具有红外透过率高、抗腐蚀能力强以及抗热冲击性能好等特点,但其力学性能和固体颗粒冲击抗力不及热压 ZnS。大多数研究人员在 ZnS 表面镀上一层保护膜或者加入一些硬度及耐侵蚀性较高的颗粒形成复合材料。Fujii A 等人^[21]通过在 ZnS 的基体中引入分散的金刚石颗粒做成复合材料,很好地提高了材料的机械性能,并使材料在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 波段保持了 $55\% \sim 70\%$ 的透过率。在 CVD ZnS 保护膜的研究方面,人们主要是针对金刚石薄膜进行研究。但金刚石薄膜沉积到 ZnS 时,由于 H 原子的存在,容易腐蚀 ZnS 材料。吕反修等人^[22]在 ZnS 表面预涂陶瓷过渡层,然后进行金刚石薄膜的沉积。结果表明,材料在 $3 \sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $8 \sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 两个光学窗口的平均透过率为 60% 。Zhu J Q 等人^[23]采用磁控溅射方法在硫化锌表面沉积碳化铬膜作为减反射膜,其沉积温度控制在 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 以内,然后在室温下利用过滤阴极真空电弧技术沉积金刚石膜,其红外透过率达到 85% 。Hei Q 等人^[24]在 ZnS 表面制备 SiO_2 薄膜过渡层,然后利用电子束蒸发技术进行 HfO_2 薄膜沉积,使 ZnS 在 $8 \sim 12\text{ }\mu\text{m}$ 波段的最高红外透过率达到 80% 。但到目前为止,如何提高 CVD ZnS 的力学性能和固体颗粒冲击抗力依然是一个亟待解决的问题。

2.4 硒化锌 ZnSe

ZnSe 的红外光学性能比 ZnS 的好,而且 ZnSe 的红外透过率受温度变化的影响较小。由于 Zn-Se 之间的离子键成分, ZnSe 烧结容易产生挥

发。Zn 和 Se 的挥发导致材料组元偏离 1:1 的化学计量比, 不易制备出 ZnSe 单晶材料。Li H Y 等人^[25]以 Zn 和 Se 为原料, 以 $\text{Zn}(\text{NH}_4)_3\text{Cl}_5$ 为传输介质, 采用化学汽相传输法制备出 ZnSe 单晶材料。该材料具有良好的红外透过率。Wang J F 等人^[26]采用 Zn 补偿源的办法, 通过将 Zn 蒸汽扩散到熔体内, 获得了符合 1:1 化学计量比的硒化锌材料。Khan T M 等人^[27]采用热蒸发法在高真空和室温条件下获得了 ZnSe 薄膜, 其红外透过率达到 89.6%。然而, ZnSe 的力学性能比 ZnS 的低, 限制了 ZnSe 在高音速飞行的飞行器和导弹中的使用。目前最有效的办法是在 ZnSe 材料表面镀上一层保护膜。Pan Y Q 等人^[28]利用脉冲真空电弧离子沉积技术在 ZnSe 表面沉积类金刚石薄膜 (DLC), 其在 2 ~ 16 μm 波段的平均红外通过率为 93.1%, 最高红外透过率达到 97.6%。Taylor 等人^[29]提出了一种在 ZnSe 表面复合 ZnS 的方法。他们制备出了具有良好红外透过率的 ZnSe/ZnS 复合层状材料。但在 ZnSe/ZnS 复合层状材料的制备过程中, 材料界面或内部容易出现杂质, 这会影响材料的红外透过率。崔红梅等人^[30]采用热等静压方法处理 ZnSe/ZnS 复合材料, 消除了材料内部缺陷, 提高了材料的红外透过率。图 2 所示为北京中材人工晶体研究院制作的 ZnS 整流罩和 ZnSe 窗口材料。

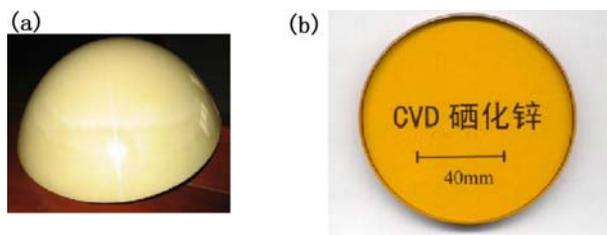


图 2 (a) ZnS 整流罩; (b) ZnSe 窗口

2.5 蓝宝石 Al_2O_3

蓝宝石为六方晶系结构, 具有优良的力学性能和热学性能, 其主要的制备方法有提拉法、导模法、泡生法、热交换法和导向温梯法。Borodin A V 等人^[31]采用改进的导模法 (LDS) 制备出了直径为 100 mm 的蓝宝石整流罩, 其红外透过率

达到 82% 以上。俄罗斯 Monocrystal 公司采用泡生法生长出了直径为 300 mm、质量为 65 kg 的蓝宝石单晶^[32]。我国元鸿光电材料有限公司能够生长出国内尺寸最大、重量为 89.5 kg 的蓝宝石单晶^[33]。图 3 所示为浙江光谷光电公司研制的蓝宝石窗口材料。



图 3 蓝宝石窗口

由于蓝宝石存在各向异性, 在高温下蓝宝石晶粒内部会产生压应力, C 轴的强度降低, 材料受到破坏, 即蓝宝石的高温热学性能较差。代兵等人^[34]综述了蓝宝石的高温失效机理, 提出采用热处理、离子掺杂等方式来提高蓝宝石的高温强度。Wang G G 等人^[35]采用改进的泡生法制备出了大尺寸蓝宝石晶体, 研究了温度对蓝宝石的强度和红外透过率的影响。他们发现, 蓝宝石内部孪晶的形成会导致其强度降低。Feng L P 等人^[36]采用射频磁控溅射法在蓝宝石表面沉积 SiO_2 薄膜, 发现 SiO_2 薄膜能够提高蓝宝石的红外透过率和蓝宝石的高温强度。限于目前材料的制备和加工水平, 将蓝宝石加工成整流罩等特殊领域的产品具有较高的成本, 因此需要对现有的制备技术进行改进和完善。近些年来, 研究人员针对这一问题提出了近尺寸成型技术, 即直接在熔体中生长整流罩。该技术正在得到一定程度的认同和发展, 比如热交换法, 它具有成分均匀和缺陷浓度小等优点。美国 Crystal

Systems Inc 公司采用热交换法生长出了直径为 380 mm、高度超过 132 mm 的蓝宝石单晶^[37]。

2.6 尖晶石

镁铝尖晶石存在光学各向同性，并具有良好的雨蚀抗力、力学和热学性能，因而被认为是白宝石的最佳替代品。图 4 所示为中非人工晶体研究院制作的尖晶石窗口材料。



图 4 尖晶石窗口

目前，国内研究人员大多采用由溶胶-凝胶法、共沉淀法和均匀沉淀法等制备的高性能尖晶石粉末，结合热压/热等静压和烧结/热等静压方法制备透明尖晶石。采用热压/热等静压方法制备的透明尖晶石主要以多晶尖晶石的形式存在。由于多晶尖晶石存在较多晶界，入射光在晶体内传播时会受到晶界残存杂质的散射和吸收，导致入射光强度减弱和多晶尖晶石的红外光学性能降低。黄存新等人^[38]采用高纯、超细的尖晶石粉末作为起始原料，用真空热压法结合热等静压后处理技术制备出了透明的多晶尖晶石材料，该材料在 0.4 ~ 5 μm 波段的红外透过率超过了 86%。

国外研究人员从 20 世纪 80 年代开始研究尖晶石，目前已经能够采用热压法获得晶粒尺寸为 1 μm 的尖晶石样品，但尖晶石样品的红外透过率较低。为此，研究人员试图采取增加烧结温度的方法来提高尖晶石的红外透过率。但温度升高会导致尖晶石晶粒尺寸较大，影响尖晶石的力学性能。最近，Krell A 等人^[39]成功地在减小尖晶石晶粒尺寸的同时，又保持了其较高

的红外透过率。但如何提高尖晶石的红外透过率而不改变尖晶石的力学性能仍然是国外研究人员主要关注的问题^[40]。

美国对透明尖晶石红外材料的研究工作非常重视。在 2010 年 4 月制订的美国小企业创新基金 (SBIR) 研制计划中有两个针对透明尖晶石材料的专项研究，其研制的高强度透明尖晶石材料的最大尺寸为 800 mm×800 mm×13 mm^[41]。国内则是从 20 世纪 90 年代初开始对透明尖晶石进行研究的。到现在为止，已经有一些成果被广泛应用于红外窗口和整流罩材料中。但与国外相比，国内的透明尖晶石制品在尺寸和加工上还有些差距^[42]。

3 透红外晶体材料的发展趋势

随着透红外晶体材料在工业方面的应用不断扩展，其在航空航天等军事领域的作用也愈发凸显。随着这项研究工作的不断深入，人们对材料性能的要求也越来越高，比如透红外晶体材料的力学性能、热学性能以及材料的加工和最终性能对材料光学性能的影响越来越明显。而这些性能与材料制备工艺和材料成分之间的关系密切。为获得质量更高的大尺寸透红外晶体材料，在材料的制备工艺方面，应该着重对现有透红外材料的制备工艺进行研究。比如蓝宝石，由于其硬度高，导致加工成本很高，材料利用率较低，因此必须研发新的制备工艺来提高材料的利用率。在材料的成分方面，首先，国内没有关于金刚石在红外技术中实际应用的报道，因而需要加快实现光学级金刚石技术难点的突破；其次，由于多晶氧化铝被认为是红外窗口和整流罩材料的理想替代材料^[43-44]，国外已经开展了较多关于多晶氧化铝的研究，而国内目前还没有这方面的报道，因此需要加强这方面的研究，以填补国内的空白。

参考文献

- [1] 任卫. 红外陶瓷 [M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1999.
- [2] 憨勇, 郑修麟, 刘正堂. ZnS 的不同制备方法及其性能对比 [J]. 材料导报, 1995, 20(4): 35-38.

- [3] Iwata H, Suzuki S, Sasaki Y. Iodine Related Grain Growth in Vapour Deposited ZnS [J]. *Crystal Growth*, 1992, **125**: 425–430.
- [4] Savage J A. Preparation and Properties of Hard Crystalline Materials for Optical Applications — A Review [J]. *Crystal Growth*, 1991, **113**: 698–715.
- [5] 么艳平, 刘景平. ZnSe 红外窗口材料的性能及其制备 [J]. *人工晶体学报*, 2006, **35**(1): 183–187.
- [6] Mollart T P. The Development of CVD Infrared Optics from Planar Windows to Missile Domes [C]. 8th Annual International Conference on Electro-Optic Windows, Domes, and Materials, 2003, **5078**: 131–135.
- [7] Kelin C A. Diamond Windows and Domes: Flexural Strength and Thermal Shock [J]. *Diamond and Related Materials*, 2002, **11**: 218–227.
- [8] Davies A R, Field J E. The Strength of Free-standing CVD Diamond [J]. *WEAR*, 2004, **256**: 153–158.
- [9] Kubarev V V. Optical Properties of the CVD-diamond in Terahertz and Infrared Ranges [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2009, **603**: 22–24.
- [10] Mollart T P. The Development of CVD Infrared Optics from Planar Windows to Missile Domes [C]. *SPIE*, 2003, **5078**: 131–135.
- [11] McGeoch S P, Placido F, Gou Z, et al. Coatings for the Protection of Diamond in High-temperature Environments [J]. *Diamond and Related Materials*, 1999, **8**: 916–919.
- [12] 陈荣发, 陈曙光, 沈茂松, 等. 金刚石膜抛光表面缺陷对其红外透射率的影响 [J]. *扬州大学学报 (自然科学版)*, 2009, **12**(3): 30–33.
- [13] 张志坚. 红外光学材料的现状与发展 [J]. *云南冶金*, 2000, **29**(5): 36–41.
- [14] 王璐璐, 刘幽若, 纪烈孔, 等. 热压多晶氟化镁研究 [J]. *无机盐工业*, 2004, **36**(1): 41–42.
- [15] Chan C S, Hon M H. Texture Effect of Hot-pressed Magnesium Fluoride on Optical Transmittance [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2003, **81**: 27–32.
- [16] Nofar M, Madaah H R, Shivaee H A. The Dependency of Optical Properties on Density for Hot Pressed MgF_2 [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2008, **51**: 546–549.
- [17] 张荣实. 红外窗口 / 整流罩技术新进展 [J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(2): 114–119.
- [18] Blodgett D W, Thomas M E. Long Wave Infrared Absorption and Scatter Properties of ZnS and ZnSe [C]. *SPIE*, 2003, **5078**: 137–138.
- [19] 杨守春. 日本开始供应远红外相机用的烧结 ZnS 镜头样品 [J]. *现代材料动态*, 2007, **10**(4): 21–25.
- [20] Block S, Piermarini G J, Blmer M. Pressure-induced Sintering of ZnS [C]. *SPIE*, 1989, **1112**: 67–73.
- [21] Fujii A, Wada H, Shibata K, et al. Diamond-ZnS Composite Infrared Window [C]. *SPIE*, 2001, **4375**: 206–210.
- [22] 吕反修, 高旭辉. 在预涂陶瓷过渡层的多谱 ZnS 衬底上沉积金刚石膜的探索研究 [J]. *人工晶体学报*, 2004, **26**(2): 105–108.
- [23] Zhu J Q, Jiang C Z, Han X, et al. Multilayer Antireflective and Protective Coatings Comprising Amorphous Diamond and Amorphous Hydrogenated Germanium Carbide for ZnS Optical Elements [J]. *Thin Solid Films*, 2008, **516**: 3117–3122.
- [24] Hei Q, Guo H B, Wei J J. Deposition of HfO_2 Thin Films on ZnS Substrates [J]. *Thin Solid Films*, 2008, **516**: 4695–4699.
- [25] Li H Y, Jie W Q, Xu K W. Growth of ZnSe Single Crystals from Zn-Se-Zn(NH_4)₃Cl₅ System [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2005, **279**: 5–12.
- [26] Wang J F, Omio A. Growth and Conductive Type Control of ZnSe Single Crystal Growth [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2001, **229**: 69–75.
- [27] Khan T M, Mehmood M F, Mahmood A, et al. Synthesis of Thermally Evaporated ZnSe Thin Film at Room Temperature [J]. *Thin Solid Films*, 2011, **519**: 5971–5977.
- [28] Pan Y Q, Hang L X, Wu Z S, et al. Design and Fabrication of Ultra Broadband Infrared Antireflection Hard Coatings on ZnSe in the Range from 2 to 16 μm [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2009, **52**: 193–195.
- [29] Taylor. Process for an Improved Laminates of ZnSe and ZnS: US, 5686195 [P]. 1997–11–11 .
- [30] 崔洪梅, 滕祥红, 钱接, 等. 热等静压处理对 CVD ZnS/ZnSe 复合材料性质的影响 [J]. *人工晶体学报*, 2011, **40**(6): 1569–1572.
- [31] Borodin A V. Advanced Technologies of Shaped Sapphire Fabrication [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2008, **310**: 2141–2147.
- [32] Demina S E, Bystrova E N, Lukanina M A, et al. Numerical Analysis of Sapphire Crystal Growth by the Kyropoulos Technique [J]. *Opt Mater*, 2007, **37**(4): 877–880.
- [33] 朱卫国, 李卫东. 联电科技园第一炉蓝宝石晶体成功问世 [N]. *济宁日报*, 2010–07–08(A01).

(下转第 26 页)