

CdSiP₂ 晶体退火及对红外光学性能的影响

林 莉, 赵北君, 朱世富, 何知宇, 陈宝军, 孙 宁, 黄 巍, 杨登辉, 钟义凯, 朱 璞

(四川大学, 四川 成都 610064)

摘 要: 采用改进的布里奇曼法生长出 CdSiP₂ 单晶体, 运用 X 射线能谱仪、傅里叶变换红外分光光度计以及红外显微镜等对在不同气氛中退火前后的 CdSiP₂ 晶体进行了组分元素、红外吸收系数以及红外透过均匀性测试, 根据红外显微镜 Mapping 图像的标准差值评判了晶体的红外透过均匀性。研究表明, 经真空、CdSiP₂ 粉末包裹、P/Cd (原子比为 2:1)、Cd 气氛等退火后, 晶体组分元素的化学计量比、红外吸收系数和红外光学均匀性都得到了不同程度的改善, 其中在 1.29~2.00 μm, 经 CdSiP₂ 粉末包裹退火后的晶体吸收系数改善显著, 在 1.92~1.98 μm 波段的红外透过均匀性提高了 14.06%; 而在 Cd 气氛下退火后晶体的吸收系数在 2.00~6.50 μm 波段降低最为明显, 在 2.70~2.78 μm 波段红外透过均匀性提高了 17.43%。分析讨论了在上述波段中引起晶体红外吸收和红外透过不均匀性的主要因素, 研究出较为有效的 CdSiP₂ 晶体退火工艺。

关键词: CdSiP₂ 晶体; 退火热处理; 红外吸收系数; 红外透射 Mapping 图像; 红外透过均匀性

中图分类号: O77⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)10-2723-06

II-IV-VI₂ 族三元化合物 CdSiP₂ 晶体属黄铜矿结构, $\bar{1}\bar{4}2$ d 空间群。它不仅具有红外透过范围宽(0.5~9 μm)、非线性光学系数大($d_{36}=84.5$ pm/V)、双折射适宜($n_o - n_e = -0.05$)^[1]、热导率高(13.6 W/m·K)、抗光损伤阈值高等优异的性质^[2], 还能采用目前已广泛使用的 1.06 μm (Nd:YAG)和 1.55 μm (掺 Er 光纤激光)泵浦, 输出 6.0 μm 以上的可调谐激光, 因而被认为是一种很有希望的中红外高功率激光频率转换新材料, 在红外对抗、红外跟踪、大气监测和激光医学等军事、民用领域有广泛应用前景^[3-5]。

CdSiP₂ 晶体的生长研究始于 20 世纪 60 年代。1967 年, Borshchevskii 等首次报道了采用卤素作载气, 通过气相运输法来生长 CdSiP₂ 晶体^[6]; 次年, Pamplin 等人报道了在锡助熔剂中生长出毫米级 CdSiP₂ 晶体^[7], 但由于生长晶体的尺寸太小, 且容易引入杂质, 不能用于器件的制备使用。2008 年, P. G. Schunemann 等人采用水平梯度冷凝法成功生长出较大尺寸的 CdSiP₂ 晶体, 并报道了 CdSiP₂ 晶体在 1 μm 处的非线性系数为 84.5 pm/V, 高于 ZnGeP₂、AgGaS₂、AgGaSe₂ 等其它同类晶体^[1, 8]。2010 年, K. T. Zawilski 等人生长得到直径为 8 mm 的 CdSiP₂ 晶体, 并对其热膨胀系数和热导率等进行了测量^[3]。2014 年, D. Sánchez 等人报道了利用 Er, Tm: Ho 光纤激光器泵浦 CSP 晶体成功获得了平均功率为 15 mW (150 pJ) 的 6.5 μm 可调谐激

光^[9, 10]。近年来, 国内四川大学和山东大学相继采用垂直布里奇曼法生长得到 CdSiP₂ 晶体^[11, 12], 并对其热学性质进行了测试。尽管 CdSiP₂ 晶体生长和器件的制备取得了长足的进步, 但由于生长过程中极高的离解压(约为 2.2×10^6 Pa)和强烈的各向异性热膨胀特性, 使得大尺寸高质量的晶体获得仍然十分困难。由于缺乏块状晶体, 制约了人们对 CdSiP₂ 晶体性质的深入研究, 迄今为止, 还未见有 CdSiP₂ 晶体退火前后红外透过均匀性的相关研究报道。

本研究对实验室生长的 CdSiP₂ 晶体进行了定向切割, 采用真空、CdSiP₂ 粉末包裹、P/Cd (原子比为 2:1)、Cd 气氛等工艺对加工制备的晶体样品进行了退火实验。分别使用 X 射线能谱仪、傅里叶变换红外分光光度计和红外显微镜的 Mapping 功能对不同气氛退火前后的晶片组分元素、红外透过率和红外透过均匀性进行分析表征, 根据测试结果讨论退火工艺对 CdSiP₂ 晶体红外吸收及不同波段下的红外透过均匀性的影响, 为提高 CdSiP₂ 晶体的光学性能提供参考。

1 实 验

1.1 样品制备

以高纯度(6N)的 Cd, Si 和 P 单质为原料, 采用双温区气相运输法结合机械振荡和温度振荡新工艺合成出 CdSiP₂ 多晶^[11, 13], 再以 CdSiP₂ 多晶为原料, 采

收稿日期: 2015-10-13

基金项目: 国家自然科学基金(51172149)

作者简介: 林 莉, 女, 1991 年生, 硕士生, 四川大学材料科学与工程学院, 四川 成都 610064, 电话: 028-85412745, E-mail: jjddlml@163.com

用改进的布里奇曼法生长出较大尺寸的 CdSiP₂ 单晶体^[14]。应用帕纳科公司的 X'Pert Pro MPD 型 X 射线衍射仪对生长的 CdSiP₂ 晶体进行定向^[15]，获得 (001) 晶面的晶体，如图 1 所示。图 2a 为定向加工的晶体表面高分辨 X 射线连扫谱，图中在 34.36° 和 72.42° 出现 {001} 晶面族二级衍射峰，分别对应于标准 PDF 卡片 (PDF73-1231) 中 CdSiP₂ 晶体的 (004) 面和 (008) 面。图 2b 为其中 (004) 面的 XRD 摇摆曲线，该摇摆峰峰形对称，强度高，表明生长的晶体具有良好的结晶性。使用 MTI 公司的 SYJ-400 型数控外圆切割机沿平行于晶体表面方向对晶体进行切割，获得了厚度为 2 mm 的暗红色透明晶片样品，分别标号为 1[#]、2[#]、3[#] 和 4[#]。为减小晶片粗糙表面在红外光学性能测试过程中的漫散射，采用沈阳科晶公司的 UNIPOL-1202 抛光机对退火前后测试的晶片进行了抛光，图 3 为抛光后晶片表面的原子力显微图像 (AFM)。由图可见，抛光后晶片样品表面的平均粗糙度为 5.7 nm，可以用于晶体光学性能的测量。

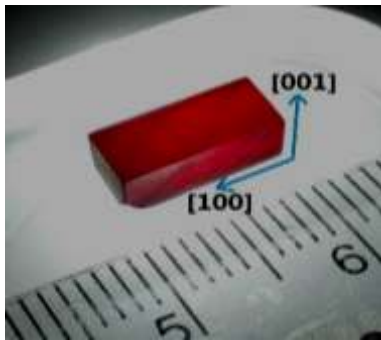


图 1 具有(001)面的 CdSiP₂ 晶体照片
Fig.1 CdSiP₂ crystal with (001) face

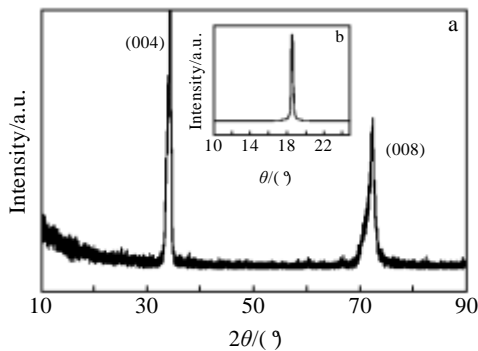


图 2 CdSiP₂ 单晶{001}晶面族 XRD 图谱和 CdSiP₂ 单晶 (004) 面 XRD 摇摆谱
Fig.2 XRD pattern of the {001} faces of CdSiP₂ single crystal (a) and XRD rocking curve of the (004) face of CdSiP₂ crystal (b)

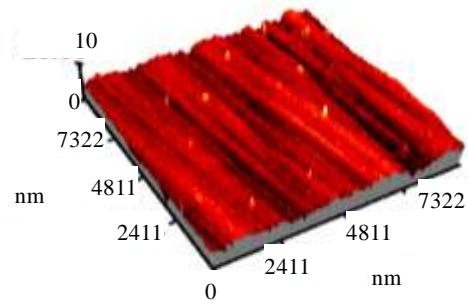


图 3 CdSiP₂ 晶体表面的 AFM 图像
Fig.3 AFM image of the CdSiP₂ wafer surface

1.2 退火与性能表征

将加工好的晶片样品分别置于装有 CdSiP₂ 同成分粉末、高纯单质 P 和 Cd 的混合物 (原子比为 2:1)、单质 Cd 以及空的石英坩埚中，抽空至 10⁻⁴ Pa 封结。将封结好的安瓿装入单温区管式电阻炉中，以 3 °C/min 的速度缓慢升温至 700 °C，保温 170 h，待保温结束后快速降至室温。

分别使用日本电子公司的 X 射线能谱仪 (JSM-7500F) 和日本岛津公司的傅里叶变换红外分光光度计 (FTIR IRprestige-21) 对退火前后晶片样品表面的元素成分和红外透过谱进行测试。应用日本岛津公司的红外显微镜 (AIM-8800) Mapping 功能^[16, 17] 对晶片的红外透过均匀性进行测试，测试选择透射模式，通过 Mapping 扫描软件控制 X-Y 工作台，利用聚焦后的红外光束对样品表面选取的 600 μm×600 μm 区域中 49 个位点进行逐点面扫描，并测量各个点的吸收光谱，如图 4 所示为 1[#] 样品测试选取的背底点和红外均匀性测试点阵列，白色线所围区域被蓝色线分割成 7×7 个小格子，每个格子即为一个 Mapping 扫描点，通过计算各点与所选背底点吸收峰积分面积比 R_{ij} (Peak Intensity Ratio) 来绘制红外透过 3D 图像^[18, 19]。

$$R_{ij} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{ij}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{00}(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

式中 λ_1 、 λ_2 分别表示测试波段的起始波长， $I_{ij}(\lambda)$ 为测试点 (i, j) 在波长为 λ 处的吸收峰强， $I_{00}(\lambda)$ 为背底点在波长为 λ 处的吸收峰强 ($\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$)。样品的红外透过均匀性 U 可通过 R_{ij} 的标准差值进行计算^[20],

$$U = \left(1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^7 (R_{ij} - \bar{R})^2}{M}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中， \bar{R} 为测试各点与背底点吸收峰积分面积比 R_{ij} 的平均值， M 为测试总点数。

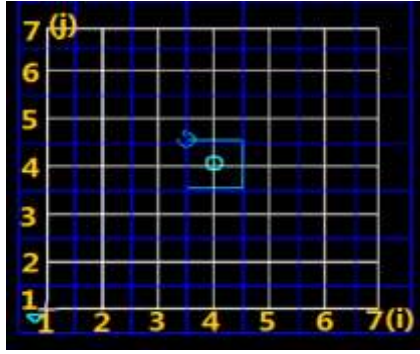


图4 红外透过均匀性区域选择

Fig.4 Area selection of infrared uniformity

1982年, A. Sodeika 等人^[21]在研究了 CdSiP₂ 晶体的本征缺陷和电学性质后指出: 在生长晶体的价带顶 ($E_V+0.45$ eV) 和导带底 ($E_C-0.63$ eV) 分别存在一个受主能级和一个主要由 P 空位引起的施主能级, 由此可以计算出相应的吸收光波长为 2.76 和 1.97 μm 处。2010年, N. C. Giles 等人^[22]通过 EPR 谱发现 CdSiP₂ 晶体中存在占优的受主缺陷 V_{Cd} 。这些缺陷的存在和不均匀分布, 极有可能引起晶体的光吸收和不均匀性。为此, 本实验主要选取 2.76 μm (3623 cm^{-1}) 和 1.97 μm (5076 cm^{-1}) 附近 2.70~2.78 μm ($3600\sim3700\text{ cm}^{-1}$) 和 1.92~1.98 μm ($5050\sim5200\text{ cm}^{-1}$) 波段开展 CdSiP₂ 晶片退火前后红外透过均匀性测试。

2 结果分析

2.1 表面组分元素

表1为采用 JSM-7500F 型 X 射线能谱仪对不同气氛条件下退火前后晶片的 EDS 分析数据。从表中可以看出, 刚生长的 CSP 晶体中都存在阴离子过剩, 阳离子不足的现象。通过在真空、CdSiP₂ 粉末包裹、富 P/Cd(原子比为 2:1)、富 Cd 气氛等条件退火, 随着晶体中富余 P 原子由晶体内部向表面扩散和环境气氛中 Cd 原子由表面向晶体内部扩散, 晶体中 P 的含量逐渐减少, Cd 的含量逐渐增加, 从而减小了晶体的化学计量比偏离。

表1 CSP 晶片退火前后的 EDS 分析数据

Table 1 EDS data of CSP crystal wafers before and after annealing (at%)

Wafers	Si	Cd	P	Total
Before annealing	25.07	23.41	51.52	100
1 [#] annealing under vacuum	24.92	23.74	51.34	100
2 [#] annealing under CdSiP ₂ atmosphere	24.67	24.27	51.06	100
3 [#] annealing under Cd:P=1:2 atmosphere	24.41	24.46	51.13	100
4 [#] annealing under Cd atmosphere	24.38	24.84	50.78	100

2.2 红外光学吸收系数

采用 IRPrestige-21 傅立叶红外光谱仪对 CdSiP₂ 晶体(001)面晶片退火前后的红外透过率进行测试, 根据双层界面公式计算晶片样品的红外光学吸收系数 α ^[16],

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln \left[\frac{\sqrt{(1-R)^4 + 4T^2R^2} - (1-R)^2}{2TR^2} \right] \quad (3)$$

$$R = (n-1)^2 / (n+1)^2 \quad (4)$$

式中, d 为晶片厚度, T 为波长为 λ 时的透过率, n 为晶体折射率, R 为反射率。CdSiP₂ 晶体为四方单轴晶, 入射光沿光轴方向入射 ($k||c$) 时, 2 条出射线偏振光波具有相同的折射率和相速, 故折射率 $n=n_o$ ^[23,24]。

图5为各晶片样品退火前后吸收系数与入射光波长的关系, 由图可见, 退火前 CdSiP₂ 晶体在 1.29~2.00 μm 范围内的平均吸收系数为 1.06 cm^{-1} , 在 2.00~6.50 μm 波段的平均吸收系数为 0.85 cm^{-1} , 在红外截止边附近的 7.14 和 7.65 μm 处存在多光子吸收峰^[1]。在真空、CdSiP₂ 同成分粉末包裹、单质 P 和 Cd 的混合物(原子比为 2:1)以及 Cd 气氛下退火后, 在 1.29~2.00 μm 范围内的平均吸收系数依次降低到 0.33, 0.30, 0.52 和 0.49 cm^{-1} , 其中经 CdSiP₂ 同成分粉末包裹退火后晶片的吸收系数得到最大程度降低; 在 2.00~6.50 μm 波段的平均吸收系数依次下降到 0.57, 0.48, 0.35 和 0.19 cm^{-1} , 其中经 Cd 气氛退火后, 晶片的吸收系数改善效果最佳。

2010年, N. C. Giles 等人^[22]研究表明 CdSiP₂ 晶体中存在占优受主能级 V_{Cd} , 由于在 Cd 气氛下退火过程中同时存在晶体内部的 Cd 空位向晶体表面迁移消失和 Cd 原子向晶体内部扩散与 Cd 空位复合的现象, 有效减少了晶体内部的 V_{Cd} 浓度和化学计量比偏离, 因此 Cd 气氛下退火对晶体 2.00~6.50 μm 波段的红外光学吸收的改善比较显著。

2.3 红外透过率均匀性

图 6a 和 6b 分别为退火前样品晶片在 1.92~1.98 μm ($5050\sim5200\text{ cm}^{-1}$) 和 2.70~2.78 μm ($3600\sim3700\text{ cm}^{-1}$) 波段的红外透射 Mapping 图像, 根据式(2)评判样品的红外透过均匀性。由图像计算得到初生长的 CdSiP₂ 晶体在 2.70~2.78 μm 波段的红外透过均匀性为 69.50%, 明显低于 1.92~1.98 μm 波段的红外透过均匀性

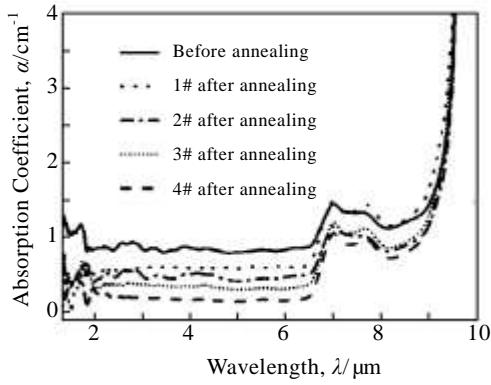


图 5 CdSiP₂ 晶体退火前后的红外吸收谱

Fig.5 Infrared absorption spectra of CdSiP₂ wafers before and after annealing

73.78%。这间接表明初生长的 CdSiP₂ 晶体中可能存在浓度较高的受主缺陷 V_{Cd}。

图 7a~7e 分别是 1#~4# 样品在 1.92~1.98 μm 波段退火前后的红外透射 Mapping 图像。由图可见，经不同气氛退火后，1#~4# 晶片样品在该波段的红外透过均匀性分别提高了 4.91%，14.06%，7.12% 和 3.4%，其中在 CdSiP₂ 粉末包裹条件下退火的 2# 晶片红外透过均匀

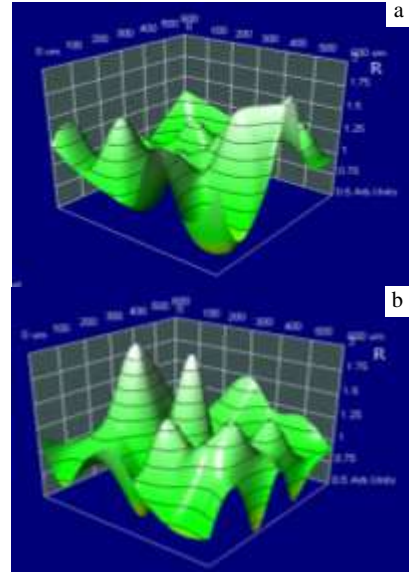


图 6 CdSiP₂ 晶体退火前红外透射 Mapping 图像

Fig.6 Infrared transmission Mapping images of CdSiP₂ wafers before and after annealing: (a) 1.92~1.98 μm (5050~5200 cm⁻¹) and (b) 2.70~2.78 μm (3600~3700 cm⁻¹)

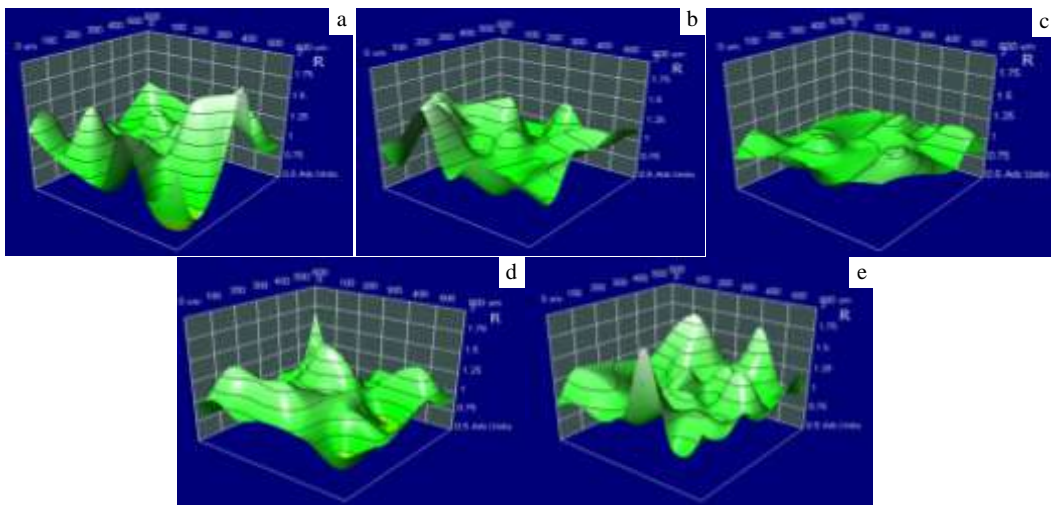


图 7 CdSiP₂ 晶体退火前后在 1.92~1.98 μm (5050~5200 cm⁻¹)波段的红外透过 Mapping 图像

Fig. 7 Infrared transmission Mapping images of CdSiP₂ wafers before and after annealing at 1.92~1.98 μm (5050~5200 cm⁻¹): (a) before annealing, (b) 1# after annealing, (c) 2# after annealing, (d) 3# after annealing, and (e) 4# after annealing

性改善效果最为明显，由原来的 73.78% 提高到 87.84%。由于该波段的不均匀性吸收主要是由晶体中施主缺陷 V_P 引起的^[21]，采用同成分粉末包裹退火更有利于减小初生长晶体中的 V_P 浓度及其不均匀分布，因此使晶体在该波段的红外透过均匀性改善效果更显著。

图 8a~8e 分别是 1#~4# 样品在不同气氛下退火前后

2.70~2.78 μm 波段的红外透射 Mapping 图像。从中可以看出，经不同工艺退火后 1#~4# 晶片在该波段的红外透过均匀性都得到了不同程度的改善，依次提高到 73.43%，77.42%，78.58% 和 86.93%。其中在富 Cd 气氛下退火后的 4# 样品红外透过均匀性提高了 17.43%。结合 A. Sodeika 和 N. C. Giles 等人的研究结果分析表

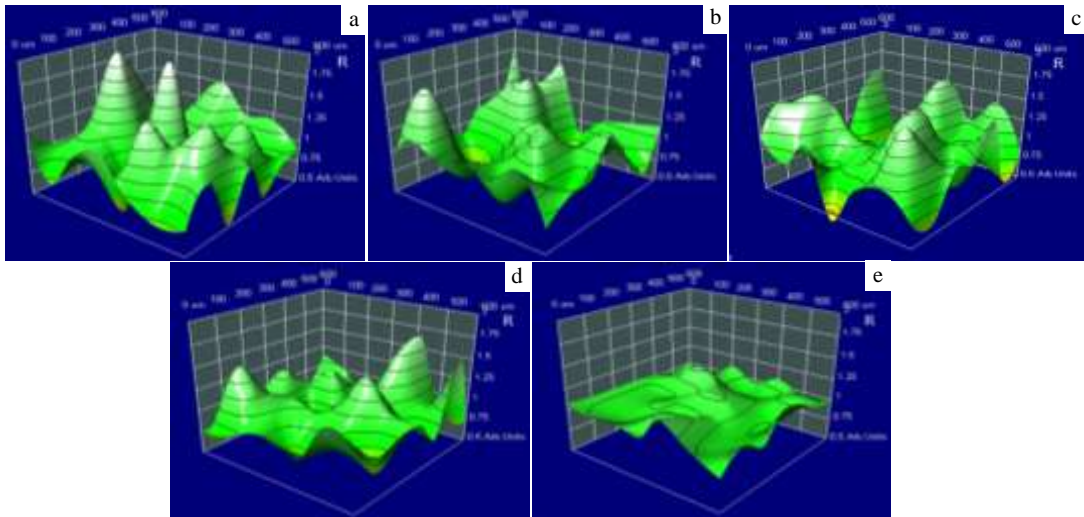


图 8 CdSiP₂ 晶体退火前后在 2.70~2.78 μm ($3600\sim 3700\text{ cm}^{-1}$) 波段的红外透射 Mapping 图像

Fig.8 Infrared transmission Mapping images of wafers before and after annealing at 2.70~2.78 μm ($3600\sim 3700\text{ cm}^{-1}$): (a) before annealing, (b) 1[#] after annealing, (c) 2[#] after annealing, (d) 3[#] after annealing, and (e) 4[#] after annealing

明^[21,22], Cd 气氛下退火不仅可以减小晶体中 V_{Cd} 的浓度,降低由 V_{Cd} 引起的在 2.70~2.78 μm 波段的光吸收,还能进一步改善晶体内部 V_{Cd} 的不均匀分布,提高该波段的红外透过均匀性。

3 结 论

1) 经不同氛围退火后, CdSiP₂ 晶片的元素成分、红外透过率和红外透过均匀性均在不同程度上获得改善,退火后晶片在整个波段上的红外吸收系数都有所降低。

2) 在 CdSiP₂ 粉末包裹条件下退火能有效降低在 1.29~2.00 μm 范围内的吸收系数,而对于由 V_{P} 导致的晶体在 1.92~1.98 μm 波段不均匀性吸收的改善效果最佳。

3) 在 Cd 气氛下退火能有效减少 CdSiP₂ 晶体中占优缺陷 V_{Cd} 的浓度和不均匀分布,对于改善晶体 2.00~6.50 μm 波段的光学吸收和 2.70~2.78 μm 波段的红外透过均匀性效果都十分显著。

参考文献 References

[1] Schunemann P G, Zawilski K T, Pollak T M. *IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS) Annual Meeting*[C]. San Jose, CA: IEEE, 2008: 306
 [2] Abrahams S C and Bernstei J L. *The Journal of Chemical Physics*[J], 1971, 55(2): 796
 [3] Zawilski K T, Schunemann P G, Pollak T C *et al. Journal of Crystal Growth*[J], 2010, 312(8): 1127

[4] Petrov V, Marchev G, Schunemann P G *et al. Optics Letters*[J], 2010, 35(8): 1230
 [5] Peremans A, Lis D, Cecchet F *et al. Optics Letters*[J], 2009, 34(20): 3053
 [6] Borshchevskii A S, Goryunova N A, Kesamanly F P *et al. Phys Status Solidi B*[J], 1967, 21(1): 9
 [7] Spring-thorpe A J, Pamplin B R. *Journal of Crystal Growth*[J], 1968, 3(4): 313
 [8] Schunemann P G, Pomeranz L A, Zawilski A T *et al. Paper AWA3*[C]. Denver, Colorado: Advanced Solid-State Photonics, 2009
 [9] Sánchez D, Hemmer M, Baudisch M *et al. Optics Letters*[J], 2014, 39(24): 6883
 [10] Zhang Z W, Reid D T, Kumar S C *et al. Optics Letters*[J], 2013, 38(23): 5113
 [11] Fan Long, Zhu Shifu, Zhao Beijun *et al. Journal of Crystal Growth*[J], 2012, 338(1): 228
 [12] Zhang Guodong, Tao Xutang, Ruan H P *et al. Journal of Crystal Growth*[J], 2012, 340(1): 197
 [13] Fan Long, Zhu Shifu, Zhao Beijun *et al. Journal of Crystal Growth*[J], 2013, 364: 62
 [14] Wu Shengling(吴圣灵), Zhao Beijun(赵北君), Zhu Shifu(朱世富) *et al. Journal of Synthetic Crystals(人工晶体学报)*[J], 2014, 43(3): 492
 [15] Li Jiawei(李佳伟), Zhu Shifu(朱世富), Zhao Beijun(赵北君) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2015, 44(5): 1289

- [16] Huang Wei, Zhao Beijun, Zhu Shifu *et al.* *Journal of Crystal Growth*[J], 2013, 362: 291
- [17] Tang Jingjing(唐婧婧), Zhao Beijun(赵北君), Zhu Shifu(朱世富) *et al.* *Journal of Synthetic Crystals*(人工晶体学报)[J], 2012, 41(2): 265
- [18] Chen Si(程 丝), Huang Zhibin(黄志斌), Wang Xinbo(王新波). *Laboratory Research of Colleges and Universities*(高校实验室工作研究)[J], 2009(04): 33
- [19] Lei Hua(雷 华). *Spectroscopy and Spectral Analysis*(光谱学与光谱分析)[J], 2000, 20(5): 687
- [20] Su Zhiguo(苏志国), Xu Jintong(许金通), Hu Qixin(胡其欣) *et al.* *Infrared and Laser Engineering*(红外与激光工程)[J], 2007, 36: 4
- [21] Sodeika A, Silevcius Z, Januskevicius Z *et al.* *Physica Status Solidi (a)* [J], 1982, 69(2): 491
- [22] Giles N C, Halliburton L E, Shan Yang *et al.* *Journal of Crystal Growth*[J], 2010, 312(8): 1133
- [23] Xiao Dingquan(肖定全), Wang Min(王 民). *The Physics of Crystal*(晶体物理学)[M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1989: 116
- [24] Kemlin V, Boulanger B, Petrov V *et al.* *Optical Materials Express*[J], 2011, 1(7): 1292

Effect of Annealing on Infrared Optical Properties of CdSiP₂ Crystal

Lin Li, Zhao Beijun, Zhu Shifu, He Zhiyu, Chen Baojun, Sun Ning, Huang Wei, Yang Denghui, Zhong Yikai, Zhu Pu
(Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: A CdSiP₂ (CSP) crystal was grown by the modified Vertical Bridgman method. Four wafers were cut from the crystal with the [001] direction and annealed under four different atmospheres, i. e. vacuum, cover-up with CSP polycrystalline powder, P/Cd (atomic ratio of 2:1) and Cd atmosphere. Then, Energy Disperse X-ray Spectroscopy, Fourier Transform Infrared Spectrophotometer and the Mapping System of Infrared Microscope were employed to analyze the properties of the CdSiP₂ wafers before and after annealing, including the elementary composition, infrared absorption coefficients and infrared transmission uniformity. The results show that all the stoichiometric deviation and infrared absorption coefficients are reduced, and infrared transmission uniformity of CSP wafers are improved to different extent after annealing. For the infrared absorption coefficients in the range of 1.29~2.00 μm, the most obvious decrease is due to annealing under cover-up with CSP polycrystalline powder. Meanwhile, the wafer treated by this method also obtains the best infrared transmission uniformity in 1.92~1.98 μm with the increase of 14.06%. The wafer annealed under the Cd atmosphere has the lowest infrared absorption coefficients in 2.00~6.50 μm among the four wafers, and has the most obvious improvement for the infrared transmission uniformity in 2.70~2.78 μm with the increase of 17.43%. The main factors resulting in nonuniform absorption and infrared transmission in the wavebands were analyzed to research the effective annealing processes.

Key words: CdSiP₂ crystal; annealing; infrared absorption coefficient; the Mapping image of infrared transmission; infrared transmission uniformity

Corresponding author: He Zhiyu, Associate Professor, College of Materials Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, P. R. China, Tel: 0086-28-85412745, E-mail: hzyscu@163.com