

Ge_xAs_ySe_{1-x-y} 硫系玻璃薄膜拉曼光谱分析

李宸汉 王 丽 甘渝林 苏雪琼

北京工业大学应用数理学院, 北京 100124

摘要 采用热蒸镀法,在石英基底上制备了不同化学组分的 Ge_xAs_ySe_{1-x-y} 硫系玻璃薄膜,并对其拉曼光谱进行测量,旨在分析化学组分对薄膜内部结构的影响。分析了波数位于 100~350 cm⁻¹ 范围内薄膜拉曼光谱的演变,用高斯曲线对拉曼光谱进行分峰拟合。结果表明,样品在 190 cm⁻¹ 处 Ge-Se 振动模式随着 Ge 和 As 含量的增加而变强;随着平均配位数(MCN)的增加,As-Se 振动模式减弱,位于 225 cm⁻¹ 和 250 cm⁻¹ 处的两个拉曼峰逐渐合并,并向高波数区域延伸;在 Ge 含量高的样品中,170~180 cm⁻¹ 处的拉曼峰是由薄膜内部键缺陷造成的。

关键词 薄膜; Ge-As-Se 硫系玻璃; 分峰拟合; 拉曼光谱; 化学结构

中图分类号 O484.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.023101

Structural Analysis of Ge_xAs_ySe_{1-x-y} Chalcogenide Glass Thin-Films by Raman Spectroscopy

Li Chenghan Wang Li Gan Yulin Su Xueqiong

College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract Thin films of Ge_xAs_ySe_{1-x-y} chalcogenide glasses with different chemical compositions are deposited by thermal evaporation from bulk material in various Ge_xAs_ySe_{1-x-y} thin films. The Raman spectroscopy of Ge_xAs_ySe_{1-x-y} chalcogenide glass films is studied to understand the influence of chemical composition on internal film structure. The evolution of Raman features in the wavenumber range from 100 cm⁻¹ to 350 cm⁻¹ is analyzed. The Raman features are fitted into different peak-fitting functions. The intensity of Ge-Se vibrational mode at 190 cm⁻¹ increases with the increasing of concentration of Ge and As. With the increasing of the mean coordination number (MCN), the intensity of As-Se vibrational mode decreases. Meanwhile, the two Raman shift modes located at 225 cm⁻¹ and 250 cm⁻¹ gradually merge and extend to high wavenumber for high MCN samples. In addition, in the films with high Ge content, the Raman features in the wavenumber range from 170 cm⁻¹ to 180 cm⁻¹ is caused by the defect modes.

Key words thin films; Ge-As-Se chalcogenide glasses; peak-fitting; Raman spectroscopy; chemical structure

OCIS codes 310.6860; 160.4670; 260.3060; 300.6450

1 引 言

硫系玻璃是以元素周期表 VIA 族元素中除氧和钋以外的硫、硒、碲三种元素和其他元素(砷、锑、锗等)共同结合形成的材料。硫系玻璃是一种非常重要的非晶材料,关于硫系玻璃的光学性质人们已经研究了 60 多年,发现其具有高折射率、低声子能量、优良的透中红外性、多样的光敏性和极高的非线性折射率系数等特点。尤其是在相变存储材料、太阳能电池、非线性光学效应和光子器件等方面,受到了广泛的关注和研究^[1-3]。Ge-As-Se 系统具有广泛的玻璃形成区域,使人们关注对其非晶微观结构的认识^[4-5]。

与晶体材料不同,非晶材料不具备长程有序性,但具有高度短程序,近邻原子之间键长及键角统计上满足近似。硫系玻璃的结构满足 8-N 规则,在衡量玻璃的网格结构中,平均配位数(MCN)是非常重要的参数,

收稿日期: 2015-07-16; 收到修改稿日期: 2015-08-10; 网络出版日期: 2015-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(11474014)、北京市教育委员会科技计划重点项目(Kz2011100050010)

作者简介: 李宸汉(1990—),男,硕士研究生,主要从事硫系玻璃和非晶氧化物薄膜制备与性质等方面的研究。

E-mail: lichenghan11@163.com

导师简介: 王 丽(1958—),女,教授,博士生导师,主要从事新型激光器件、非线性光学、激光沉积制备半导体薄膜材料等方面的研究。E-mail: Lwang.1@bjut.edu.cn(通信联系人)

被广泛认为与玻璃的许多物理性质相关。本文研究的 $\text{Ge}_x\text{As}_y\text{Se}_{1-x-y}$ 硫系玻璃平均配位数定义为 $Z=[4x+3y+2(100-x-y)]/100$, 其中 4、3 和 2 分别表示 Ge、As 和 Se 原子各自的配位数。Thorpe 等^[6-8]已经证实 Ge-As-Se 随着其微观结构的变化具有三个相, 并且取决于 MCN。Phillips^[7]和 Thorpe 等^[9]采用约束计数理论计算指出, 当 MCN 为 2.4 时存在软性-刚性的转变相。Tanaka^[10]指出 MCN 为 2.67 时存在第二个转变相, 拓扑结构从 2D 向 3D 刚性相转变。Boolchand 等^[11-12]指出, 在软性相和刚性相之间存在一个中间相, 中间相与玻璃结构和化学组分密切相关, 并在这个区域内发现了热可逆窗口。此外, 在三元结构中, 大量物理参数的阈值都出现在中间相区域^[13]。

本文实验研究的 $\text{Ge}_x\text{As}_y\text{Se}_{1-x-y}$ 硫系玻璃薄膜有较宽的组成范围, $5 \leq x \leq 33$, $5 \leq y \leq 35$, 都处在玻璃形成区域^[4-5], 对于 Ge-As-Se 三元结构, 基本单元为四面体结构的 $\text{GeSe}_{4/2}$ 和锥形结构的 $\text{AsSe}_{3/2}$, 由 Se 链碎片以随机方式链接^[14]。由于拉曼光谱具有敏感探测材料变化的特点^[15], 本文测试了 Ge-As-Se 薄膜的拉曼光谱, 测试后的光谱由于各个振动模式的重叠, 形成一个宽的包络, 所以在拉曼光谱中提取单个振动模式显得至关重要。本文通过氩离子束蒸镀法制备硫系玻璃薄膜^[16], 采用拉曼光谱拟合方法研究 Ge-As-Se 薄膜结构, 基于拟合结果, 分析 Ge-As-Se 薄膜内部振动模式随着化学组分变化的演变过程。

2 实 验

实验所用的 10 组不同化学组分 $\text{Ge}_x\text{As}_y\text{Se}_{1-x-y}$ 块体玻璃通过常规的熔融淬火法制备, 将高纯度(99.999%)的 Ge、As 和 Se 单质材料分别放入充满氮气的手套箱内进行称量, 混合后放入清洗并干燥的石英试管中, 在温度为 100 °C 条件下干燥 4 h, 以去除原材料表面的水分。真空条件下将石英试管用氢氧炬密封, 然后将其放入摇摆炉内, 升温至 900 °C 熔制至少 30 h。根据玻璃的组分, 在预定温度下(600 °C~700 °C)将熔制后的石英管从摇摆炉内取出并在空气中猝冷。为了减小内部应力, 缓缓退火至室温。将制备好的高纯度 Ge-As-Se 块体玻璃作为热蒸发源, 石英片为衬底, 靶材与基片距离为 40 cm。镀膜时, 用 50 eV、1 A 氩离子束蒸镀 3 min, 薄膜以 20~50 nm/s 速率生长至 1 μm 左右。

由于非晶态的玻璃材料在扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)中并不能观测到晶格条纹, 因此, 只采用原子力显微镜(AFM)测试了 Ge-As-Se 薄膜样品的表面形貌。采用 ALPHA 300 型 AFM, Si 探针测得样品表面相位图, 对图像形貌进行分析。采用德国 Witec 公司 ALPHA 300RAS 激光拉曼共聚焦光谱分析仪测试了 Ge-As-Se 薄膜样品的拉曼光谱, 测试范围为 0~1100 cm^{-1} , 激发波长为 532 nm, 并保持较小的激光功率以避免激发光产生的热诱导效应。Ge-As-Se 薄膜中不同化学键的相互作用会导致拉曼峰的重叠^[16], 用 Peak fit 4.12 软件对拉曼光谱进行合理的拟合, 由于高斯线型不但能够描述各个峰的细节, 而且有利于分析重叠的峰位, 故采用高斯线型对光谱进行拟合。

3 结果与分析

表 1 列出了 10 组样品的化学组分, 大部分样品处于中间相区域, 其中 $\text{Ge}_5\text{As}_{10}\text{Se}_{85}$ 样品处于软性相区域,

表 1 $\text{Ge}_x\text{As}_y\text{Se}_{1-x-y}$ 薄膜化学成分、MCN 及化学计量

Table 1 Chemical composition, MCN and stoichiometry of $\text{Ge}_x\text{As}_y\text{Se}_{1-x-y}$ film

Sample	Ge	As	Se	MCN	Stoichiometry
1	5	10	85	2.2	Se-rich
2	10	20	70	2.4	Se-rich
3	17.5	11	71.5	2.46	Ge-rich
4	11.5	24	64.5	2.47	As-rich
5	20	10	70	2.5	Ge-rich
6	22.5	5	72.5	2.5	Ge-rich
7	10	35	55	2.55	As-rich
8	18.75	7.5	63.75	2.55	Ge-rich
9	22	20	58	2.64	Ge-rich
10	33	12	55	2.78	Ge-rich

$\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ 样品处于刚性相区域。薄膜的AFM测试结果如图1所示。测试结果表明薄膜表面平滑均匀,偶有相对较大的颗粒,可能由于在热蒸发沉积薄膜时,玻璃材料在真空腔内熔化过程中产生相分离,烧结船中出现剧烈的鼓泡和溅射所产生。

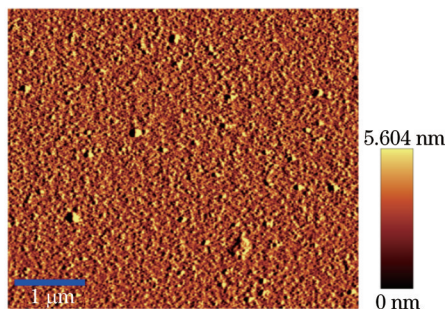


图1 Ge-As-Se薄膜样品表面形貌的AFM相位图

Fig.1 Morphology and surface topography of Ge-As-Se thin film by AFM

Ge-As-Se玻璃薄膜样品的拉曼光谱图如图2所示。所有样品的振动能量范围几乎相同,都在 $100\sim 350\text{ cm}^{-1}$ 范围内,表明Ge、As和Se三种元素具有相似质量和键能。薄膜样品的光谱有如下特点:1) $\text{Ge}_5\text{As}_{10}\text{Se}_{85}$ 样品在 250 cm^{-1} 处存在一个非对称峰,并且随着Ge和As含量的增加而逐渐变宽;2) 在 193 cm^{-1} 处存在一个拉曼峰,在Ge含量低的薄膜中不存在,峰的强度随着Ge含量的增加而增加;3) 随着As含量的增加,位于 225 cm^{-1} 处和 250 cm^{-1} 处的拉曼峰逐渐合并,并向高波数区域延伸;4) 在 $170\sim 180\text{ cm}^{-1}$ 处存在一个“肩”,并且只在Ge含量最高的 $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ 样品中出现。

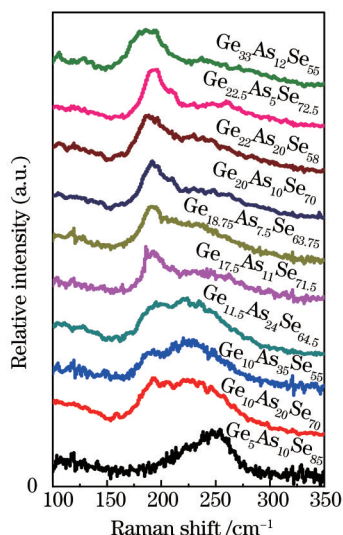


图2 不同化学组分的Ge-As-Se拉曼光谱图(根据Ge含量的高低排列)

Fig.2 Reduced Raman spectra of glasses with different chemical composition. The spectra are shifted along the y -axis according to the content of Ge

对于Ge-As-Se玻璃,Ge-Se和As-Se单元是其网格的基本单元^[16],所以从Ge-Se和As-Se的各个振动模式着手对拉曼光谱进行分析。Tronc等^[17]称, 250 cm^{-1} 处的峰对应Se-Se键的环状结构和链状结构,位于 $193\sim 198\text{ cm}^{-1}$ 和 213 cm^{-1} 附近的峰,分别由 $\text{GeSe}_{4/2}$ 四面体共角和共边的振动模式所致^[18-19]。 175 cm^{-1} 和 290 cm^{-1} 处出现的拉曼峰由Ge-Ge键引起。在 $\text{Ge}_x\text{Se}_{1-x}$ ($0.33\leq x\leq 0.42$)玻璃中由于Ge和Se的配位数分别为4和2,所以不存在Ge-Ge键^[20]。 225 cm^{-1} 和 243 cm^{-1} 处的拉曼峰分别对应锥形的 $\text{AsSe}_{3/2}$ 锥形结构和 As_2Se_4 笼状结构,另外一种笼状结构的 As_4Se_3 在 256 cm^{-1} 处也具有拉曼活性^[21]。在 $\text{Ge}_y\text{As}_y\text{Se}_{1-2y}$ 玻璃中含有等量的Ge和As,As-As键和Ge-Ge键作为网格主干的一部分,可以增加网格的稳定性^[22]。随着Ge含量的逐渐升高, $170\sim 180\text{ cm}^{-1}$ 出现一个“肩”,这是由于Ge-Ge键、As-As键或是Se-Se键的键缺陷造成,这些键缺陷会引起光学损耗^[23-24]。

为了分析随着化学组分的变化,Ge-As-Se薄膜内部振动模式的演变过程,对拉曼光谱进行拟合。由于

Ge-As-Se薄膜样品较薄,信号强度不及块体材料,激发波长较短,测得拉曼光谱噪声较大,在拟合前将拉曼光谱进行去噪声处理。拟合过程中,依据硫系玻璃的内部化学键确定拟合后各个峰的峰位,以确保拉曼光谱可以合理地反映Ge-As-Se薄膜结构。由于洛伦兹函数适合描述硫系玻璃中某些单键的自然展宽过程,而高斯函数有利于分析由非均匀键导致的峰的重叠,图3中拉曼光谱重叠现象明显,所以分别将Ge、As和Se含量最高的拉曼光谱分解成几个高斯曲线,如图3所示。将薄膜样品的宽带曲线分解成数个高斯曲线,可以认为总的光谱是由大量振动模式所组成。由于在元素周期表上接近,故Ge、As和Se原子具有相似的原子半径和质量,用一种元素替换另外一种元素不会导致显著的振动频率转移,但在无定形材料中,这种替代将使频带扩宽,因此很难将光谱分解成许多有意义的高斯曲线。

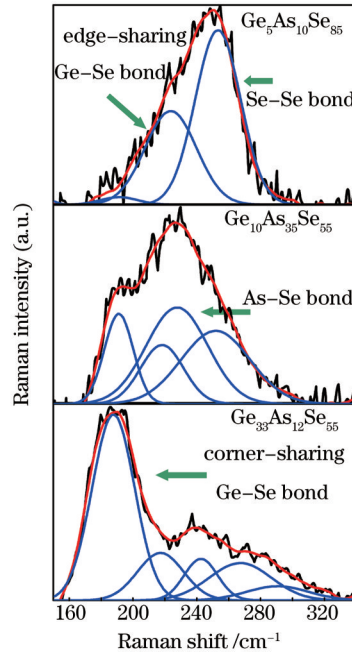


图3 拟合后的 $\text{Ge}_5\text{As}_{10}\text{Se}_{85}$ 、 $\text{Ge}_{10}\text{As}_{35}\text{Se}_{55}$ 和 $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ 薄膜拉曼光谱

Fig.3 Peak-fitting Raman spectra of $\text{Ge}_5\text{As}_{10}\text{Se}_{85}$, $\text{Ge}_{10}\text{As}_{35}\text{Se}_{55}$ and $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ thin films

如图3所示,正如之前的报道,在富Se样品中,如 $\text{Ge}_5\text{As}_{10}\text{Se}_{85}$,由于Ge-Se和As-Se键能高于Ge-Ge和As-As,薄膜中不存在Ge-Ge和As-As振动模式。薄膜中的 $\text{GeSe}_{4/2}$ 和 $\text{AsSe}_{3/2}$ 结构单元由Se-Se链相连接。由于Se含量较高,网格中主要存在Se-Se键,使 250 cm^{-1} 处Se-Se键对应的峰占据了主导位置,同时存在 $\text{GeSe}_{4/2}$ 四面体共角振动模式,As $\text{Se}_{3/2}$ 锥形结构的形成受到限制。

随着Ge或As含量的增加,平均配位数增加,薄膜中主要存在 $\text{GeSe}_{4/2}$ 和 $\text{AsSe}_{3/2}$,Se-Se长链几乎不存在,但 $\text{GeSe}_{4/2}$ 和 $\text{AsSe}_{3/2}$ 结构单元依旧由Se-Se键连接,此时薄膜内部依旧维持三元结构。另外,随着Ge和As含量的进一步增加,平均配位数大于2.67的阈值,玻璃薄膜内部由三元结构分离为二元结构。由于Se已被Ge和As消耗完,得不到Se原子的Ge和As原子将会形成同质键,如Ge-Ge键和As-As键,同质键缺陷增加。此时 $\text{GeSe}_{4/2}$ 和 $\text{AsSe}_{3/2}$ 结构单元不再完全由Se-Se键连接。As $\text{Se}_{3/2}$ 锥形结构中的Se会被Ge或As取代,但依然维持锥形结构,由于Ge和As比Se元素轻,这种取代将导致拉曼峰对应的波数稍有升高。

在As含量高的样品中,Ge-Se键对应的振动模式逐渐减弱,尽管如此, $\text{GeSe}_{4/2}$ 四面体共边振动模式依然保持相对稳定的强度。 $200\sim 300\text{ cm}^{-1}$ 范围内的As-Se特征峰与 $\text{GeSe}_{4/2}$ 四面体共边的振动模式重叠,经过拟合发现,随着As含量的增加,位于 225 cm^{-1} 和 243 cm^{-1} 处的拉曼峰变强,分别对应As $\text{Se}_{3/2}$ 锥形结构和As Se_4 笼状结构。所以认为As含量较高的薄膜中As-Se键占据主导地位。在富Ge样品中,玻璃网格中主要存在 $\text{GeSe}_{4/2}$ 四面体结构, 190 cm^{-1} 对应的共角振动模式强度随Ge含量的增加而变强。虽然没有共角振动模式强,但 213 cm^{-1} 对应的共边振动模式强度依然相对稳定。

4 结 论

测量了10组不同化学计量的 $\text{Ge}_x\text{As}_y\text{Se}_{1-x-y}$ 硫系玻璃薄膜的拉曼光谱,薄膜组成范围为 $5\leq x\leq 33$, $5\leq y\leq 35$,

薄膜表面平滑均匀。为了解 Ge-As-Se 玻璃的化学结构与化学组分的关系,对其进行了拉曼光谱的测量,用高斯曲线将拉曼光谱分解成数个结构单元。研究表明,随着 Ge 和 As 含量的增加,190 cm^{-1} 处共角振动模式增强; $\text{AsSe}_{3/2}$ 锥形结构在 225 cm^{-1} 处的拉曼峰与 Se-Se 键在 250 cm^{-1} 处合并并向高波数延伸,是由于 Se 的耗尽以及代替所引起; Ge-As-Se 薄膜中首先形成 $\text{GeSe}_{4/2}$ 和 $\text{AsSe}_{3/2}$, 并由 Se-Se 链连接,随着 Ge 和 As 含量的增加 Se-Se 长链几乎不存在; 170~180 cm^{-1} 处的“肩”只存在于 Ge 含量高的样品中,是由同极的 Ge-Ge 键和 As-As 键的键缺陷引起的。

参 考 文 献

- 1 Seddon A B. Chalcogenide glasses: A review of their preparation, properties and applications[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1995, 184: 44-50.
- 2 Han Jintao, Zhang Wei, Wei Fengjuan, *et al.*. Investigation of wideband slow light in $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ photonic crystal slab waveguides[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(6): 0606002.
韩金涛, 张 巍, 魏凤娟, 等. $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ 硫基光子晶体平板波导的宽带慢光特性研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0606002.
- 3 Wang Xianwang, Zhang Wei, Han Jintao, *et al.*. Investigation of structure design and transmission characteristic of GeSbSe photonic crystal waveguides[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0105001.
王贤旺, 张 巍, 韩金涛, 等. GeSbSe 光子晶体波导结构设计及传输特性研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0105001.
- 4 Borisova Z U. *Glassy Semiconductors*[M]. New York: Springer, 1981.
- 5 Qu T, Georgiev D G, Boolchand P, *et al.*. The intermediate phase in ternary $\text{Ge}_x\text{As}_y\text{Se}_{1-2x}$ glasses[C]. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 2002, 754: CC8.1.
- 6 Boolchand P, Georgiev D G, Qu T, *et al.*. Nanoscale phase separation effects near $\bar{r} = 2.4$ and 2.67, and rigidity transitions in chalcogenide glasses[J]. *Comptes Rendus Chimie*, 2002, 5(11): 713-724.
- 7 Phillips J C. Topology of covalent non-crystalline solids I: Short-range order in chalcogenide alloys[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1979, 34(2): 153-181.
- 8 Thorpe M F. Continuous deformations in random networks[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1983, 57(3): 355-370.
- 9 Thorpe M F, Jacobs D J, Chubynsky M V, *et al.*. Self-organization in network glasses[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2000, 266: 859-866.
- 10 Tanaka K. Structural phase transitions in chalcogenide glasses[J]. *Physical Review B*, 1989, 39(2): 1270-1279.
- 11 Boolchand P, Lucovsky G, Phillips J C, *et al.*. Self-organization and the physics of glassy networks[J]. *Philosophical Magazine*, 2005, 85(32): 3823-3838.
- 12 Chakravarty S, Georgiev D G, Boolchand P, *et al.*. Ageing, fragility and the reversibility window in bulk alloy glasses[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2005, 17(1): L1.
- 13 Gan Y L, Wang L, Su X Q, *et al.*. Thermal conductivity of $\text{Ge}_x\text{Sb}(\text{As})_y\text{Se}_{100-x-y}$ glasses measured by Raman scattering spectra [J]. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2014, 45(5): 377-382.
- 14 Wang R P, Smith A, Prasad A, *et al.*. Raman spectra of $\text{Ge}_x\text{As}_y\text{Se}_{1-x-y}$ glasses[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(4): 043520.
- 15 Ma Jing. Low-concentration detection of chlorobenzene based on laser Raman spectroscopy[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0215001.
马 靖. 基于激光拉曼光谱的氯苯低浓度探测[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0215001.
- 16 Li Ding, Xiong Shengming. Mid-infrared properties of oxide coatings prepared by ion beam sputtering deposition[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(1): 0107002.
李 定, 熊胜明. 离子束溅射氧化物薄膜的中红外特性[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0107002.
- 17 Gan Y L, Wang L. Analysis of Raman spectra of GeAsSe glass using different peak-fitting method[C]. *SPIE*, 2015, 9446: 94461V.
- 18 Wang Y, Matsuda O, Inoue K, *et al.*. A Raman scattering investigation of the structure of glassy and liquid $\text{Ge}_x\text{Se}_{1-x}$ [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1998, 232: 702-707.
- 19 Sugai S. Stochastic random network model in Ge and Si chalcogenide glasses[J]. *Physical Review B*, 1987, 35(3): 1345.
- 20 Murase K, Fukunaga T, Yakushiji K, *et al.*. Investigation of stability of (Ge, Sn)-(S, or Se) 42 cluster vibrational spectra[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1983, 59: 883-886.
- 21 Tronc P, Bensoussan M, Brenac A, *et al.*. Raman scattering and local order in $\text{Ge}_x\text{Se}_{1-x}$ glasses for $1/3 \leq x \leq 1/2$ [J]. *Journal de Physique*, 1977, 38(12): 1493-1498.

- 22 Ystenes M, Brockner W, Menzel F. Scaled quantum mechanical (SQM) calculations and vibrational analyses of the cage-like molecules P_4S_3 , As_4Se_3 , P_4Se_3 , As_4S_3 , and PA_3S_3 [J]. *Vibrational Spectroscopy*, 1993, 5(2): 195-204.
- 23 Mamedov S, Georgiev D G, Qu T, *et al.*. Evidence for nanoscale phase separation of stressed-rigid glasses[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2003, 15(31): S2397.
- 24 Wang Shitong, Yang Yongying, Zhao Limin, *et al.*. Numerical simulation research on scattering light imaging of surface defects of optical components[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(7): 0708005.
- 王世通, 杨甬英, 赵丽敏, 等. 光学元件表面缺陷散射光成像数值模拟研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(7): 0708005.

栏目编辑: 吴秀娟