

DOI: 10.11973/jxgcl201806001

高压下光电材料结构相变及物理性能的研究进展

李莎莎, 张刚华, 曾 涛

(上海材料研究所, 上海市工程材料应用与评价重点实验室, 上海 200437)

摘要: 高压技术能够有效调节光电材料的晶格和电子态, 是调控光电材料物理性能的可行手段及合成新光电材料的重要方法。概述了国内外光电材料的高压研究现状, 介绍了高压作用对光电材料晶体结构、电子构型及物理性能的影响, 分析了高压下光吸收、电导率及光电性能的增强机制, 探讨了压力诱导结构相变与物理性能的内在联系。展望了光电材料高压研究的发展。

关键词: 光电材料; 晶体结构; 物理性能; 高压

中图分类号: TB321 文献标志码: A 文章编号: 1000-3738(2018)06-0001-06

Research Progress on Structure Phase Transition and Physical Properties of Photoelectric Materials Under High-Pressure

LI Shasha, ZHANG Ganghua, ZENG Tao

(Shanghai Key Laboratory of Engineering Materials Application and Evaluation,

Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, China)

Abstract: High-pressure technique can efficiently tune the crystal lattice and electronic state of photoelectric materials. It is a feasible route to adjust physical properties of photoelectric materials, and an important method for synthesizing new photoelectric materials. A review of the high-pressure research progress on photoelectric materials is summarized. The effects of high-pressure condition on the crystal structure, electronic configuration and physical properties of photoelectric materials are described. The mechanism of enhancing light absorption, conductivity and photoelectric performance is analyzed. The intrinsic relation between the pressure-induced structural phase transition and physical properties is discussed. The development possibility of the high-pressure research on photoelectric materials is in prospect.

Key words: photoelectric material; crystal structure; physical property; high-pressure

0 引言

新能源的开发是解决能源危机的重要途径之一, 作为新能源中的重中之重, 太阳能的开发和利用得到了全世界的关注。光电材料是指具有光能和电能相互转换功能的一类材料, 包括光催化材料、发光材料以及光伏材料等。理论研究表明, 当禁带宽度在 1.0~1.6 eV 时光电材料具有较高的太阳能转换效率^[1]。目前, 光电材料按化学成分可分为硅、Ⅲ~V 族化合物、硫族化合物、金属氧化物、钙钛矿型金属卤化物和有机聚合物等。其中, 硅基光电材料已实现规模化生产, 但其光电转换机制决定了只有当

光的能量超过禁带宽度时才能产生电流, 这就导致了太阳能转化的难题, 即小的禁带宽度能吸收更多太阳光子, 产生较大电流但电压不足; 大的禁带宽度能产生较大电压但电流有限, 大部分太阳光子不能被吸收。因此, 硅基光电材料的转换效率达到了当前概念和技术手段的极限^[2]。若要获得更高的转换效率, 硅基光电器件的结构将更加复杂, 价格也更昂贵。其他新型光电材料在实际应用中也面临着诸多限制, 其中最主要的一个因素是光电转化效率低。由于存在光子吸收损耗、光生载流子复合和阻抗等因素, 光电器件在工作时的短路电流、开路电压和填充因子均低于肖克利-奎塞尔(S-Q)理论极限值, 因此其光电转化效率也远低于 S-Q 理论极限值。如何提高光电转换效率, 降低制备成本, 是光电材料获得广泛应用所面临的首要问题。

压力是一个基本的热力学参量,可以有效调节晶体的晶格和电子态,特别是微观粒子的量子态。在过去的半个世纪,高压和同步辐射技术取得了快速发展。随着高压技术在材料研究领域中的应用,很多基本物理化学规律被打破;根据常压物理化学性质建立的元素周期表需要进行较大的修正,常压下无法获得的具有某一结构及性能的新材料可在高温高压条件下制备得到。高压技术通过调控晶体结构和电子构型而改变材料的物理和化学性质。目前,有关压力对材料结构与物理性能影响的研究报道较多^[3-8],也得到了许多新颖独特的物理现象,如金属钠在高压下可转变为宽带隙绝缘体^[5],硫化氢气体在高压下发生高温超导转变^[9],氢气在高压下呈现出金属性^[10]等。高压技术具有优异的稳定性和可控性,不仅可以研究晶体结构与物理性能的内在联系,还可以改变和控制材料的物理性能,因此在光伏器件领域有着巨大的应用潜力。目前,高压技术在光电材料领域已有一定的应用研究,为了给相关研究人员提供参考,作者主要对高压下硫族化合物、钙钛矿型金属卤化物和金属氧化物等光电材料结构与物理性能变化的研究进展进行了概述。

1 硫族化合物光电材料

依据化学成分的不同,硫族化合物光电材料可分为两类:二元硫族化合物,如Ⅲ~Ⅵ族化合物、Ⅲ~Ⅴ族化合物等;多元硫族化合物,如 CuInSe₂、CuIn_{0.5}Ga_{0.5}Se₂ 等。硫族化合物具有丰富的结构类型和良好的物理性能,是目前研究最为广泛的光电材料之一。此外,硫族化合物光电材料多为层状结构,相对于其他材料而言,其结构最易受到压力的影响。

1.1 二元硫族化合物

BENKHETTOU 等^[11]利用密度泛函理论研究了镉硫族化合物(CdS、CdSe 和 CdTe)在高压下的相变,发现 CdS、CdSe 和 CdTe 在高压下具有几乎相似的相变行为;随压力的增加,这些化合物均从六方晶系转变为斜方晶系,最后变为正交晶系。赵景庚等^[12-13]认为高压可以调控硫族金属化合物 Bi₂Te₃、Sb₂Te₃ 和 Bi₂Se₃ 的晶体结构,并研究了 In₂Se₃、As₂Te₃、Bi₂S₃ 和 Bi₂(Te,Se)₃ 等 A₂B₃ 型金属硫族化合物在高压作用下的结构演变和电输运性能,结果发现:As₂Te₃ 在压力约 13.2 GPa 下由 6 配位单斜结构(α 相)转变为与 γ-Bi₂Te₃ 结构相似的 7 配位单斜结

构(γ 相),当压力达 26.5 GPa 时,完全转变为 γ 相;当压力在 8.17~26.5 GPa 时,α-As₂Te₃ 会发生两个“等结构相变”(α' 相和 α" 相),即当压力在 8.17~13.2 GPa 时,α-As₂Te₃ 向 α' 相转变,材料由绝缘性变为半金属性,当压力高于 13.2 GPa 时,向 α" 相和 γ 相转变,材料从半金属性转变为金属性;导电性的增强是因为高压作用使材料发生化学键的收缩以及电子构型的重新排布,导致禁带逐渐闭合。由于导电性是材料内部载流子浓度和迁移率共同作用的结果,因此高压技术可以作为调控硫族光电材料光电性能的开关,这为探索硫族光电材料的新物相和新物理性能提供了可行方法。

1.2 多元硫族化合物

GONZÁLEZ 等^[14]测试了 CuInSe₂ 和 CuInS₂ 单晶在 0~20 GPa 静水压下的光学吸收行为,发现随着压力的增大,CuInSe₂ 和 CuInS₂ 单晶的禁带宽度分别以 30,24 μeV·Pa⁻¹ 的速率线性增大,当压力分别高于 7.1,9.6 GPa 时,这两种单晶均发生了不可逆的结构转变,从黄铜矿结构转变为 NaCl 型岩盐结构,禁带宽度分别由 0.98,1.48 eV 增大到 1.19,1.71 eV。这种禁带宽度随压力增大的现象也出现在 LiInSe₂、CuInTe₂、CuGa(S_xSe_{1-x})₂、CuIn_{0.5}Ga_{0.5}Se₂ 等材料中^[15-18],这主要是由高压诱导结构相变而引起的。在压力条件下材料晶格的扭曲或拉伸引起电子结构的变化,导致禁带的延伸。禁带宽度是决定材料光电性能的重要参数之一,通过高压诱导结构相变,可以使材料的禁带宽度接近光电材料的理想禁带宽度(约 1.5 eV)。目前,对硫族光电材料的高压研究主要集中在结构相变上。

2 钙钛矿型金属卤化物光电材料

钙钛矿型金属卤化物光电材料具有通式 AMX₃,其中 A 是有机胺阳离子或碱金属离子,M 通常为 Pb²⁺ 或 Sn²⁺,X 为 Cl⁻、Br⁻、I⁻ 或 BF₄⁻^[19] 等。AMX₃ 型钙钛矿结构由对顶点连接的 MX₆ 八面体骨架和穿插在骨架缝隙中的有机铵阳离子组成,该类化合物具有复杂的内建电场和优越的结构容忍度,可以通过置换 A 位阳离子、M 位金属离子或卤化物阴离子等来调控其光电性能。由于具有较低的制备成本、较好的柔性和力学性能和较高的光电转换效率^[20-22],钙钛矿型金属卤化物已成为新型太阳能电池的备选材料,并因此受到了广泛关注。目前,钙钛矿型金属卤化物的高压研究主要集中在以

下两种材料上。

2.1 钙钛矿型无机金属卤化物

钙钛矿型无机金属卤化物中的A位一般为碱金属离子,常见的无机金属卤化物为 CsPbX_3 (X为 Cl^- 、 Br^- 、 I^-)。在室温下无惰性气体保护时,钙钛矿型无机金属卤化物具有比有机金属卤化物更高的稳定性^[23],并且表现出优异的光致发光性能和较高的量子效率^[24]。ZHANG等^[25]研究了钙钛矿型无机金属卤化物 CsPbBr_3 在高压下的结构和光学性质,发现当压力小于1.0 GPa时, CsPbBr_3 的吸收光谱随压力的增加而红移,当压力大于1.0 GPa后,吸收光谱持续蓝移直至晶体完全非晶化;当压力为1.2 GPa时, CsPbBr_3 发生等结构相变,这是因为在高压作用下, $\text{Pb}-\text{Br}$ 键收缩, PbBr_6 八面体发生畸变;非晶化是因为在高压作用下 PbBr_6 八面体发生严重扭曲和倾斜,导致晶体结构坍塌。由此可见,高压下 CsPbBr_3 的光学性能变化与其晶体结构的演变密切相关。在 CsPbI_3 中也观测到了相似的压力诱导结构相变和荧光偏移现象^[26]。

此外,NAGAOKA等^[27]通过高压技术研究了 CsPbBr_3 在微观尺度下的相转变对材料宏观光学性能的影响,发现在经过0→17 GPa循环加压后, CsPbBr_3 纳米立方小颗粒会有序聚集形成新的纳米片状结构,这种纳米片状晶的荧光量子效率比纳米立方晶的高1.6倍,且具有更长的荧光寿命;该相变并不涉及晶体结构的变化,而是由纳米晶体重结晶生长而导致的。因此,高压技术不仅可以调节钙钛矿型无机金属卤化物的晶体结构,还可以改变其晶体形貌,从而有效调控材料的光学性能。

2.2 钙钛矿型有机金属卤化物

钙钛矿型有机金属卤化物的A位一般为有机胺阳离子,如 CH_3NH_3^+ 和 $\text{NH}_2\text{CHNH}_2^+$ 等,A位有机阳离子的尺寸决定了有机金属卤化物是以三维钙钛矿结构存在还是以低维形式存在^[28]。要得到稳定的三维钙钛矿型金属卤化物, MX_6 八面体网络应有足够的空间容纳A位阳离子;A位阳离子的尺寸对材料的禁带宽度有一定的影响,阳离子尺寸小则禁带宽度较低^[29]。M位金属离子一般为 Pb^{2+} 或 Sn^{2+} ,锡与铅同属于IV主族元素,具有相似的核外电子分布。 ASnI_3 在室温下为赝立方结构(空间群为 $P4mm$),比 APbI_3 具有更高的结构对称性,禁带宽度比 APbI_3 的低约0.3 eV^[30];二者均为直接带隙半导体,具有明显的吸收边。锡被认为是最具潜力的元素^[31]。

铅制备无铅钙钛矿型太阳能电池最具潜力的元素^[31]。X位一般为 I^- 、 Br^- 和 Cl^- ,以及按一定比例混合的 I^- 、 Br^- 和 Cl^- ,这可以提高钙钛矿型有机金属卤化物的光电性能^[32-33]。

利用高压技术可以制备新型功能材料并对其结构和性能进行有效调控。SWAINSON等^[34]研究了静水压对 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ 结构的影响,发现当压力在1 GPa以下时, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ 晶体从立方晶系、 $Pm\bar{3}m$ 空间群转变为立方晶系、 $Im\bar{3}m$ 空间群,但SWAINSON等并未在更高压力下进行试验研究,仅由理论计算结果推测认为,在更高压力下 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ 的结构将转变为正交相 $Pnma$ 。WANG等^[35]利用静水压代替化学压调节 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ 的晶体结构和物理性能,发现在加压过程中,当压力低于2 GPa时, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ 发生两个结构相变,晶体从 $Pm\bar{3}m$ 空间群转变为 $Im\bar{3}m$ 空间群,然后变为 $Pnma$;当压力高于2 GPa时,由于 PbBr_6 八面体的倾斜和有机阳离子有序性的破坏, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ 发生可逆的非晶化相转变;当压力达到25 GPa时,材料的非晶化相变完成,电阻比在常压下的增加了5个数量级,但材料仍保持半导体特性并对可见光有明显的响应。该研究表明高压技术可以实现钙钛矿型有机金属卤化物在光伏器件中的转换或控制,也揭示了非晶态的有机金属卤化物同样是一种潜在的光吸收材料。尽管随压力的增加, $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ 由晶态转变成非晶态,其光电响应在一定程度上有所下降,但在高达30 GPa甚至更高的压力下,非晶态 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ 也表现出相当高的光电流。这是由于压力诱导形成的非晶态 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ 保留了类似钙钛矿骨架的结构特征,形成了一种原子排列具有很高有序度的非晶玻璃态。为了进一步探究这种非晶化对材料性能的影响,LÜ等^[36]通过压力诱导使钙钛矿型有机金属卤化物 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{SnCl}_3$ 发生非晶化和重结晶,从而改善了其结构稳定性,并有效提升了光电性能;重结晶后材料的导电率增加了300%,可见光响应显著增强。

综上所述,钙钛矿型有机/无机金属卤化物的晶体结构和光电性能在压力的作用下均有明显的改变。对此类光电材料进行高压作用下的结构和性能演变研究不仅有助于进一步揭示钙钛矿体系的光伏机制,还可以为寻找性能更优异的新型光电材料提供理论指导和试验依据。

3 金属氧化物光电材料

金属氧化物光电材料具有良好的物理化学性能,且制备工艺简单,在光催化和太阳能电池等领域有着良好的应用前景。其中:二元金属氧化物(如 TiO_2 、 ZnO 、 SnO_2 、 Ta_2O_5 和 GeO_2 等)由于具有优异的光催化性能和光电性能,已在环境保护和染料敏化太阳能电池领域得到了广泛研究;而铁电氧化物因具有较高的输出光生电压、良好的电场调控光伏性能等优点,在光伏电池、光驱动器和光传感器等领域应用较多。相对于传统光伏材料,铁电氧化物光电材料具有以下优点:(1)与传统光伏材料通过界面P-N结的内建电场不同,铁电极化电场能够有效降低光生电子与空穴的复合率,从而大大提升光伏材料的光电转换效率;(2)传统光伏材料的P-N结开路电压一般都小于1V,而在具有特定电畴的铁电材料中,光生电压能够突破材料禁带宽度的限制;(3)铁电材料的制备工艺简单,生产成本较低,更易实现大规模生产。

3.1 二元金属氧化物

作为一种非常重要的能源材料, TiO_2 的导电性不佳一直是制约其应用的主要因素之一。铌离子掺杂虽然可以在一定程度上改善 TiO_2 的导电性,但该导电性还远未达到应用的要求。LÜ等^[37]通过压力诱导铌掺杂 TiO_2 相变,进一步增强了该类材料的电输运性能,导电性提高了40%。LÜ等^[38]还发现,在19GPa压力下, Ta_2O_5 单晶纳米线发生了非晶化,并且所获非晶态 Ta_2O_5 纳米线的电导率得到了明显的改善;在压力作用下, Ta_2O_5 单晶中的某些特定化合键的键合强度趋于弱化,沿a轴方向特定位置多面体(TaO_6 八面体或 TaO_7 双锥体)间的连续性受到破坏,导致 Ta_2O_5 的非晶化;这种非晶态 Ta_2O_5 依然保持着原本的一维形态,电导率比传统的非晶态相提高了一个数量级。因此,可以预测这种由压力诱导形成的非晶态纳米材料的光电性能将大大优于其常压晶态材料的或传统非晶态材料的。

3.2 铁电氧化物

目前,虽然对新型窄带隙铁电材料的探索和现有铁电材料光电性能的优化研究已有了许多重要成果,但铁电材料光电转换效率依然很低,这主要是由于缺乏有效手段对铁电材料的铁电性与导电性进行同步优化。铁电性(主要是极化强度)直接影响铁电材料的光电特性(光生电流和电压),剩余极化强度

越大,光生电流和光电转换效率越高。但铁电材料的电阻率较高、导电性较差,这就导致载流子浓度和迁移率都很低,阻碍了铁电材料光电转换效率的进一步提升。

HAUMONT等^[39]通过同步辐射技术和远红外光谱,发现在压力为3.5GPa时, $BiFeO_3$ 晶体转变为单斜晶系,由于阳离子发生轻微的位移而具有倾斜的八面体结构,该结构相依然保持半导体特性;当压力进一步增加到10GPa以上时, $BiFeO_3$ 中的阳离子位移受到抑制,晶体转变为非极性的斜方晶系, $Pnma$ 空间群,该结构相呈金属性;斜方晶系结构相的形成与理论预测的一致,而单斜晶系结构相在理论上尚未被预测到,极有可能是一种新的铁电相。2017年,ZHANG等^[40]研究发现,在高于7GPa压力下, $KBiFe_2O_5$ 晶体从正交晶系、 $P2_1cn$ 空间群转变为正交晶系、 $Cmc2_1$ 空间群,该高压相是一种新的铁电相,其剩余极化强度比常压下的提高了4倍以上,可见外加压力增强了 $KBiFe_2O_5$ 的铁电极化;在压力作用下, $KBiFe_2O_5$ 的禁带宽度变窄,由常压下的约1.6eV变为高压下的约1.52eV,趋近于光电材料的理想禁带宽度,其导电性增强,在可见光照射下压力为30GPa时的光生电流比常压时的提升了3个数量级。因此,该压力诱导形成的铁电相材料是一种很有希望的新型铁电光伏材料,并且在光敏传感器上具有应用潜力。等静压技术可以调控铁电氧化物材料的晶体结构、铁电性能和光电性能,在设计和开发高性能铁电光伏材料方面有着巨大的应用空间。

4 结束语

迄今为止,由于存在光电转换效率低、制备成本高等问题,能够实际应用的光电材料较少。高压技术可以有效调控光电材料的晶体结构和物理性能,同时也是制备新型光电材料的重要方法。近年来,高压技术已得到广泛应用,且已得到许多独特的结果。

(1)高压技术能够有效调控硫族光电材料的禁带宽度和电导率,但尚未有该材料在高压下光电性能的研究报道;压力诱导相变是未来材料光电性能优化的一个研究方向。

(2)在压力诱导下,钙钛矿型金属卤化物光电材料发生重结晶和非晶化,导致光电性能的提高,但该高压诱导的结构相变大多是可逆的,如何稳定高压诱导形成的结晶相和非晶相是光电性能优化研究

的主要方向。

(3) 对铁电光电材料的高压研究尚处于起步阶段,但已有结果表明,高压技术在铁电光电材料的禁带宽度调控、导电性能优化、铁电极化以及光电性能提升方面有着较大的研究潜力。

(4) 高压技术在新型光电材料的制备和光电性能调控上具有极大的发展潜力,是未来开发新型高效光电材料的新途径。

参考文献:

- [1] YANG S Y, SEIDEL J, BYRNES S J, et al. Above-bandgap voltages from ferroelectric photovoltaic devices[J]. *Nature Nanotechnology*, 2010, 5: 143-147.
- [2] 蔡苇,符春林,高家诚,等.铁电薄膜光伏效应及形成机制研究进展[J].*真空科学与技术学报*,2012,32(7):559-565.
- [3] JAFFE A, LIN Y, MAO W L, et al. Pressure-induced conductivity and yellow-to-black piezochromism in a layered Cu—Cl hybrid perovskite[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2015, 137(4): 1673-1678.
- [4] MAO W L, WANG L, DING Y, et al. Distortions and stabilization of simple-cubic calcium at high pressure and low temperature[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United State of America*, 2010, 107 (22): 9965-9968.
- [5] MA Y, EREMETS M, OGANO A R, et al. Transparent dense sodium[J]. *Nature*, 2009, 458(7235): 182-185.
- [6] YAO M G, WANG T Y, YAO Z, et al. Pressure-driven topological transformations of iodine confined in one-dimensional channels[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2013, 117(47): 25052-25058.
- [7] ZHANG M, DANG Y Q, LIU T Y, et al. Pressure-induced fluorescence enhancement of the BSA-protected gold nanoclusters and the corresponding conformational changes of protein[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2013, 117 (1): 639-647.
- [8] LI Q, LI S, WANG K, et al. Compression studies of face-to-face π -stacking interaction in sodium squarate salts: $\text{Na}_2\text{C}_4\text{O}_4$ and $\text{Na}_2\text{C}_4\text{O}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2012, 137(18): 184905.
- [9] DROZDOV A P, EREMETS M I, TROYAN I A, et al. Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system[J]. *Nature*, 2015, 525 (7567): 73-76.
- [10] EREMETS M I, TROYAN I A. Conductive dense hydrogen [J]. *Nature Materials*, 2011, 10(12): 927-931.
- [11] BENKHETTOU N, RACHED D, RABAH M. *Ab-initio* calculation of stability and structural properties of cadmium chalcogenides CdS , CdSe , and CdTe under high pressure[J]. *Czechoslovak Journal of Physics*, 2006, 56(4): 409-418.
- [12] ZHAO J G, YANG L X, YU Z H, et al. Structural phase transitions and metallized phenomena in arsenic telluride under high pressure[J]. *Inorganic Chemistry*, 2016, 55(8): 3907-3914.
- [13] 赵景庚,杨留响,于振海,等. A_2B_3 型金属硫族化合物的高压结构和物性研究[C]//第十八届中国高压科学学术会议缩编文集.成都:中国物理学会,2016.
- [14] GONZÁLEZ J, RINCÓN C. Optical absorption and phase transitions in CuInSe_2 and CuInS_2 single crystals at high pressure[J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, 65(5): 2031-2034.
- [15] BEISTER H J, VES S, HONLE W, et al. Structural phase transitions and optical absorption of LiInSe_2 under pressure [J]. *Physical Review B*, 1991, 43: 9642.
- [16] GONZALEZ J, RINCÓN C. Optical absorption and phase transitions in Cu-III-VI_2 compound semiconductors at high pressure[J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1990, 51(9): 1093-1097.
- [17] GONZÁLEZ J, CALDERÓN J, TINOCO T, et al. $\text{CuGa}(\text{S}_x\text{Se}_{1-x})_2$ alloys at high pressure: Optical absorption and X-ray diffraction studies[J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1995, 56(3/4): 507-516.
- [18] PLUENGPHON P, BOVORN RATANARAKS T, PINSOOK U, et al. The effects of Na on high pressure phases of $\text{CuIn}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{Se}_2$ from *ab initio* calculation[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2012, 24: 095802.
- [19] NAGANE S, BANSODE U, GAME O, et al. $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_{(3-x)}(\text{BF}_4)_x$: Molecular ion substituted hybrid perovskite[J]. *Chemical Communications*, 2014, 50 (68): 9741-9744.
- [20] GREEN M A, HO-BAILLIE A, SNAITH H J. The emergence of perovskite solar cells[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(7): 506-514.
- [21] BURSCHKA J, PELLET N, MOON S J, et al. Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells[J]. *Nature*, 2013, 499(7458): 316-319.
- [22] HODES G. Perovskite-based solar cells[J]. *Science*, 2013, 342(6156): 317-318.
- [23] SONG J Z, XU L M, LI J H, et al. Monolayer and few-layer all-inorganic perovskites as a new family of two-dimensional semiconductors for printable optoelectronic devices [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(24): 4861-4869.
- [24] PROTEDESCU L, YAKUNIN S, BODNARCHUK M I, et al. Nanocrystals of cesium lead halide perovskites (CsPbX_3 , $\text{X}=\text{Cl}$, Br , and I): Novel optoelectronic materials showing bright emission with wide color gamut[J]. *Nano Letters*, 2015, 15(6): 3692-3696.
- [25] ZHANG L, ZENG Q X, WANG K. Pressure-induced structural and optical properties of inorganic halide perovskite CsPbBr_3 [J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2017, 8(16): 3752-3758.
- [26] BEIMBORN J C, PORNTHIP T Y, DUKOVIC G, et al. Pressure response of photoluminescence in cesium lead iodide

- perovskite nanocrystals[J]. The Journal of Chemical Physics, 2018. DOI: 10.1021/acs.jpcc.8b03280.
- [27] NAGAOKA Y, KATIE H K, LI Y P, et al. Nanocube superlattices of cesium lead bromide perovskites and pressure-induced phase transformations at atomic and mesoscale levels [J]. Advanced Materials, 2017, 29: 1606666.
- [28] MITZI D B, WANG S, FIELD C A, et al. Conducting layered organic-inorganic halides containing $<110>$ -oriented perovskite sheets[J]. Science, 1995, 267(5203): 1473-1476.
- [29] LANG L, YANG J H, LIU H R, et al. First-principles study on the electronic and optical properties of cubic ABX_3 halide perovskites[J]. Physics Letters A, 2014, 378(3): 290-293.
- [30] STOUMPOS C C, MALLIAKAS C D, KANATZIDIS M G. Semiconducting tin and lead iodide perovskites with organic cations: Phase transitions, high mobilities, and near-infrared photoluminescent properties[J]. Inorganic Chemistry, 2013, 52(15): 9019-9038.
- [31] UMARI P, MOSCONI E, DE ANGELIS F. Relativistic GW calculations on $CH_3NH_3PbI_3$ and $CH_3NH_3SnI_3$ perovskites for solar cell applications[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 4467-4473.
- [32] 关丽,李明军,李旭,等.有机卤化物钙钛矿太阳能电池的研究进展[J].科学通报,2015,60(7):581-592.
- [33] 邵景珍,董伟伟,邓赞红,等.基于有机金属卤化物钙钛矿材料的全固态太阳能电池研究进展[J].功能材料,2014,45(24): 24008-24103.
- [34] SWAINSON I P, TUCKER M G, WILSON D J, et al. Pressure response of an organic-inorganic perovskite:
- Methylammonium lead bromide[J]. Chemistry of Materials, 2007, 19(10): 2401-2405.
- [35] WANG Y G, LÜ X J, YANG W G, et al. Pressure-induced phase transformation, reversible amorphization, and anomalous visible light response in organolead bromide perovskite[J]. Journal of the American Chemical Society, 2015, 137(34): 11144-11149.
- [36] LÜ X J, WANG Y G, STOUMPOS C C, et al. Enhanced structural stability and photo responsiveness of $CH_3NH_3SnI_3$ perovskite via pressure-induced amorphization and recrystallization[J]. Advanced Materials, 2016, 28 (39): 8663-8668.
- [37] LÜ X J, YANG W G, QUAN Z W, et al. Enhanced electron transport in Nb-doped TiO_2 nanoparticles via pressure-induced phase transitions [J]. Journal of the American Chemical Society, 2014, 136(1): 419-426.
- [38] LÜ X J, HU Q Y, YANG W G, et al. Pressure-induced amorphization in single-crystal Ta_2O_5 nanowires: A kinetic mechanism and improved electrical conductivity[J]. Journal of the American Chemical Society, 2013, 135 (37): 13947-13953.
- [39] HAUMONT R, BOUVIER P, PASHKIN A, et al. Effect of high pressure on multiferroic $BiFeO_3$ [J]. Physical Review B, 2009, 79(18): 184110.
- [40] ZHANG G H, LIU F L, GU T T, et al. Enhanced ferroelectric and visible-light photoelectric properties in multiferroic $KBiFe_2O_5$ via pressure-induced phase transition [J]. Advanced Electronic Materials, 2017, 3(3): 1600498.

“电子陶瓷材料制备及应用进展”征稿启事

电子陶瓷是指具有电、磁、光、热、力学等性能及其相互转化特性的一类功能陶瓷,包括电绝缘、电介质、铁电、压电、热释电、敏感、导电、超导、磁性等陶瓷,在电子、通讯、自动控制、信息、激光、医疗、机械、汽车、航空航天、核技术和生物技术等领域中作为关键材料得到了广泛应用。各经济发达国家和地区都将电子陶瓷列为优先发展的材料,其研究和开发十分活跃。

为了集中展示我国电子陶瓷材料的最新研究进展,促进学术交流,推动相关领域向纵深发展,《机械工程材料》将于2019年6月推出“电子陶瓷材料制备及应用进展”专题报道,现公开征集相关领域的高水平研究论文及综述。

1 征稿范围

先进电子陶瓷材料(单晶)的制备方法、性能表征及前沿科学研究进展,主要包括但不仅限于以下方向:(1)介电陶瓷;(2)电绝缘陶瓷;(3)半导体陶瓷;(4)压电陶瓷;(5)快离子导体陶瓷;(6)高温超导陶瓷;(7)超级电容器。

2 截稿日期

2019年1月15日

3 投稿方式

通过材料与测试网 <http://www.mat-test.com> 的“在线投审稿”进入投稿页面,注册后投稿,在文题上备注“电子陶瓷专题投稿”。

4 特邀组稿专家

曾涛研究员 上海材料研究所上海市工程材料应用与评价重点实验室常务副主任,压电材料及器件研究中心主任,美国索雷博光电科技公司高级顾问,日本琦玉工业大学客座教授。曾涛研究员长期从事压电铁电材料及器件领域的研究,主持过上海市军民融合专项项目、兵器工业集团协同创新项目、上海市科技人才计划项目、美国索雷博光电科技公司和韩国电力集团委托项目等课题,先后获得欧盟玛丽居里国际奖学金、上海市浦江人才、上海市优秀技术带头人等荣誉。

5 编辑部联系方式

电话:021-65541496;021-65556775-368

邮箱:mem@mat-test.com

《机械工程材料》编辑部