基于(*E*)-*N*,*N*-二甲基-4-(2-(吡啶-4-基)乙烯基) 苯胺的锌/镉有机--无机杂化金属卤化物的结构和发光性质

王申字¹ 陈 典² 刘晓莉² 王硕文² 苑亚南² 王振平² 杨 春^{*,2} (¹吉林大学化学学院,长春 130012) (²河北工业大学化工学院,天津 300130)

摘要:以(*E*)-*N*,*N*-二甲基-4-(2-(吡啶-4-基)乙烯基)苯胺(EDPVA)为有机源,以金属卤化物ZnX₂和CdX₂为无机源,用相应的浓酸HX(X=Cl、Br)提供酸性介质,通过溶剂缓慢挥发法得到了4个离子型单核有机-无机杂化金属卤化物(H₂EDPVA)[ZnCl₄](1)、(H₂EDPVA)[ZnBr₄](2)、(H₂EDPVA)[CdCl₄](3)和(H₂EDPVA)[CdBr₄](4)。X射线单晶衍射分析表明,交替排列的刚性有机阳离子(H₂EDPVA)²⁺和稍微扭曲的四面体形无机阴离子[MX₄]²⁻(M=Zn、Cd;X=Cl、Br)之间存在静电作用和氢键。发光性质研究表明,化合物1~4的蓝色磷光峰分别位于459、446、440和434 nm,斯托克斯位移分别为79、72、61和55 nm,半峰宽分别为100、88、87 和100 nm,发光寿命τ分别为0.47、8.38、18.38和11.62 μs。发光机理分析表明:化合物1~4的磷光发射是有机阳离子和无机阴离子协同作用的结果。

关键词:低维结构;杂化金属卤化物;光致发光;晶体结构
中图分类号:0614.24*1;0614.24*2
文献标识码:A
文章编号:1001-4861(2022)09-1659-06
DOI:10.11862/CJIC.2022.198

Structures and Photoluminescence Properties of Zinc(II)/Cadmium(II)-Based Organic-Inorganic Hybrid Metal Halides Derived from (E)-N,N-Dimethyl-4-(2-(pyridin-4-yl)vinyl)aniline

WANG Shen-Yu¹ CHEN Dian² LIU Xiao-Li² WANG Shuo-Wen²

YUAN Ya-Nan² WANG Zhen-Ping² YANG Chun^{*,2}

(¹College of Chemistry, Jilin University, Changchun 130012, China) (²School of Chemical Engineering and Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: With (*E*)-*N*,*N*-dimethyl-4-(2-(pyridin-4-yl)vinyl)aniline (EDPVA) as the organic source, and metal halides ZnX₂ and CdX₂ as the inorganic source, using the corresponding concentrated HX (X=Cl, Br) to provide acidic medium, four ionic mononuclear organic-inorganic hybrid metal halides, (H₂EDPVA)[ZnCl₄] (1), (H₂EDPVA)[ZnBr₄] (2), (H₂EDPVA)[CdCl₄] (3) and (H₂EDPVA)[CdBr₄] (4), were obtained by slow evaporation of solvent. Single crystal structure analysis shows that there were electrostatic interactions and hydrogen bonds between the alternative rigid organic cations (H₂EDPVA)²⁺ and slightly distorted tetrahedral inorganic anions [MX₄]²⁻ (M=Zn, Cd; X=Cl, Br). The photoluminescence properties of compounds 1~4 showed that the blue phosphorescence peaks were at 459, 446, 440 and 434 nm, respectively; the Stokes shifts were 79, 72, 61 and 55 nm, respectively; the full widths at half-maximum were 100, 88, 87 and 100 nm, respectively; the luminescence lifetimes (τ) were 0.47, 8.38, 18.38 and 11.62 µs, respectively. According to the photoluminescence mechanism analysis, the phosphorescent emission of

国家自然科学基金(No.21101096)和河北省引进留学人员资助项目(No.C20200317)资助。

收稿日期:2021-07-08。收修改稿日期:2021-07-25。

^{*}通信联系人。E-mail:ychun@hebut.edu.cn

compounds $1 \sim 4$ is the result of synergistic action of organic cations $(H_2 EDPVA)^{2+}$ and inorganic anions $[ZnX_4]^{2-}$ or $[CdX_4]^{2-}$ (X=Cl, Br), respectively. CCDC: 2094237, 1; 2094238, 2; 2094239, 3; 2094240, 4.

Keywords: low dimensional structure; hybrid metal halides; photoluminescence; crystal structure

0 引 言

有机-无机杂化金属卤化物是一类集结构多 样、可塑性高的有机部分和高稳定性、带隙可调的 无机部分的优势于一身的新型材料,其中金属卤化 物组分和有机胺组分交替堆积形成超晶格量子阱 结构。量子限域效应和介电约束效应的联合作用 使得此类材料具有较大的激子结合能,表现出强的 室温光致发光特性、较高的载流子迁移率和非线性 光学效应等优异的光电性能,在磁学、光学和热力 学方面有着十分广阔的应用前景^[1-2]。

在固态照明中,由于荧光粉在发光二极管(LED) 中的重要作用,新荧光粉的需求在过去几年里一直 在强劲增长^[3]。通过取代低效的白炽灯和荧光灯光 源,这项技术有望大大降低照明用电量。为得到白 光,现在广泛采取的技术主要有以下3种:(1)在蓝 色 LED 上涂覆黄色荧光粉^[4-5];(2)在紫外 LED 上涂 覆红色、绿色和蓝色荧光粉的混合物^[6-7];(3)直接使 用红、绿、蓝 LED 的混合物。蓝光作为三基色之一, 在形成白光的过程中具有十分重要的地位,但目前 蓝光材料的研究仍然较少。近年来,低维杂化卤化 铅钙钛矿被证明是一种很有前途的发光材料^[8]。然 而,铅(II)的存在会导致严重的毒性和环境问题。近 年来,科研工作者一直在寻求铅的替代金属,致力 于得到无铅的蓝光材料。

我们使用(H₂EDPVA)²⁺,即质子化的(*E*)-*N*,*N*-二 甲基-4-(2-(吡啶-4-基)乙烯基)苯胺作为有机阳离子, 以金属卤化物 ZnCl₂、ZnBr₂、CdCl₂、CdBr₂为无机源, 通过溶液缓慢挥发法合成了化合物(H₂EDPVA) [ZnCl₄] (1)、(H₂EDPVA)[ZnBr₄] (2)、(H₂EDPVA)[CdCl₄] (3)和(H₂EDPVA)[CdBr₄] (4),表征了其晶体结构,研究 了其发光性质。

1 实验部分

1.1 实验试剂与仪器

氧化锌(ZnO)、氯化镉水合物(CdCl₂·2.5H₂O)、溴 化镉水合物(CdBr₂·4H₂O)、4-甲基吡啶(C₆H₇N)均购买 于安耐吉试剂公司,纯度不低于98%;4-二甲基氨基 苯甲醛、氢氧化钾(KOH)购自麦克林试剂公司,纯度 不低于98%;无水甲醇为分析纯,购自科密欧试剂 公司;盐酸购自洛阳昊华化学试剂有限公司。所购 试剂均未经过进一步纯化,直接用于实验。

元素分析使用 Perkin-Elmer 240C 元素分析仪。 'H NMR 谱使用 BRUCKER AC-P500 型核磁共振仪 (300 MHz)。单晶 X 射线衍射分析在 Rigaku XtaLAB P200 衍射仪上进行。在 200 或 300 K下,用经过石 墨单色器单色化的 Cu Kα射线(λ=0.154 184 nm)以ω -2θ扫描方式收集衍射数据。晶体结构用直接法解 出,然后用最小二乘法对全部非氢原子坐标及其温 度因子进行精修。氢原子的位置由理论加氢得到。 所有的计算使用 SHELXS-97 和 SHELXL-97 程序 包^[9-10]进行。使用 Rigaku B/Max-RB 型号粉末衍射仪 进行粉末 X 射线衍射分析(PXRD)的测试,铜靶作为 射线发射源,λ=0.154 178 nm,工作电压 40 kV,工作 电流 40 mA,扫描范围为 2θ=5°~50°。使用 HORIBA Fluoro Log-3荧光光谱仪测试发射光谱及发光寿命, 并采集相关数据。

CCDC: 2094237, 1; 2094238, 2; 2094239, 3; 2094240, 4_°

1.2 化合物1~4的合成

1.2.1 EDPVA的合成

参考文献方法^[11-14]合成了 EDPVA(图 1)。具体 步骤是:将4-二甲基氨基苯甲醛(4.0 g, 26.8 mmol)、4 -甲基吡啶(5.2 mL, 53.6 mmol)和氢氧化钾(1.6 g, 8.5 mmol)加入到干燥的 25 mL圆底烧瓶中。在 N₂气氛 中加热回流 2 h。反应结束后,待反应产物冷却至室 温,将其倒入冰水中洗涤并过滤,对所得固体粗产 物用 750 mL 乙醇重结晶,得到亮黄色片状晶体。 'H NMR(CDCl₃):δ 8.48(2H, d, J=4.99 Hz),7.45(2H, d,



图 1 EDPVA 的合成路线 Fig.1 Synthetic route of EDPVA

J=8.83 Hz), 7.31(1H, d, J=16.10 Hz), 6.80(1H, d, J= 16.17 Hz), 7.37(2H, d, J=6.18 Hz), 6.70(2H, d, J=8.85 Hz), 3.02 (6H, s)。元素分析按 C₁₅H₁₆N₂的计算值 (%): C, 80.32; H, 7.19; N, 12.49。实测值(%): C, 80.04; H, 7.41; N, 12.83。

1.2.2 化合物1~4的合成

化合物1的合成:分别称取0.0301g(0.37 mmol)ZnO和0.0292g(0.13 mmol)EDPVA,先后加入到盛有50mL甲醇的锥形瓶中,再加入2mL浓HCl,加热搅拌使固体原料完全溶解。过滤,滤液在空气中缓慢挥发。约2d后出现无色片状晶体,过滤,并用少量丙酮洗涤固体产品,得到适合X射线衍射分析的最终产物1,产率为42.5%。元素分析按C₁₅H₁₈N₂ZnCl₄的计算值(%):C,41.55;H,4.18;N,6.46。实测值(%):C,41.40;H,4.41;N,6.53。

用浓 HBr代替浓 HCl,其余步骤与合成化合物 1 相同,即合成了化合物 2,产率为 45.3%。元素分析 按 C₁₅H₁₈N₂ZnBr₄的计算值(%):C,29.47;H,2.97;N, 4.58。实测值(%):C,29.55;H,3.18;N,4.46。

用0.0297g(0.13 mmol) CdCl₂·2.5H₂O代替ZnO, 其余步骤与合成化合物1相同,得到化合物3,产率 为40.3%。元素分析按C₁₅H₁₈N₂CdCl₄的计算值(%): C,37.49;H,3.78;N,5.83。实测值(%):C,37.28;H, 3.51;N,5.93。

用 0.044 8 g(0.13 mmol) CdBr₂·4H₂O 代替 ZnO, 并用浓 HBr代替浓 HCl,其余步骤与合成化合物 1 相同,即得化合物 4,产率为 53.4%。元素分析按 C₁₅H₁₈N₂CdBr₄的计算值(%):C,27.37;H,2.76;N, 4.26。实测值(%):C,27.54;H,2.52;N,4.17。

2 结果与讨论

2.1 化合物1~4的晶体结构描述

单晶 X 射线衍射分析表明化合物 1~4结构类 似,在此以化合物 1 为例进行晶体结构描述。化合物 1 属于单斜晶系, P2₁/n 空间群。图 2 为化合物 1 的晶体结构图。1 的最小不对称单元由一个两端 N 原子(N1、N2)都被质子化的有机阳离子(H₂EDPVA)²⁺ 和一个四面体形无机阴离子[ZnCl₄]²⁻组成, 两者交替 排列形成离子型单核杂化金属卤化物。其中, Zn1—Cl1、Zn1—Cl2、Zn1—Cl3 和 Zn1—Cl4 的 键 长分别为 0.227 93(5)、0.230 24(6)、0.224 98(6) 和 0.224 68(7) nm, Cl—Zn—Cl的键角范围为 105.11(2)° ~113.75(2)°, 说明[ZnCl₄]²⁻四面体稍有扭曲。化合物 1的晶体学参数见表 1。

除静电相互作用外,化合物1中还存在着大量 的氢键相互作用。如图3所示,N—H…Cl的N…Cl 距离范围为0.310 4~0.332 7 nm,∠N—H…Cl范围为 127.36°~155.18°;C—H…Cl的C…Cl距离范围为 0.332 8~0.381 3 nm,∠C—H…Cl范围为117.04°~ 158.04°,与文献报道的数值基本一致^[3]。化合物1 中部分键长、键角见表S1(Supporting information),氢 键数据见表S2。

与化合物1类似,化合物2~4中的有机阳离子 (H₂EDPVA)²⁺分别与[ZnBr₄]²⁻、[CdCl₄]²⁻、[CdBr₄]²⁻交替

图2 化合物1的晶体结构: (a) 不对称单元; (b) 晶体结构堆积(为清晰起见,已省略氢原子; 绿色多面体代表[ZnCl₄]²⁻四面体)

Fig.2 Crystal structure of compound 1: (a) asymmetric unit; (b) packing of crystal structure (for clarity, the hydrogen atoms have been omitted; the green polyhedron represents $[ZnCl_4]^{2-}$ tetrahedron)

Compound	1	2	3	4
Empirical formula	$\mathrm{C_{15}H_{18}ZnCl_4N_2}$	$\mathrm{C_{15}H_{18}ZnBr_{4}N_{2}}$	$\mathrm{C_{15}H_{18}CdCl_4N_2}$	$\mathrm{C_{15}H_{18}CdBr_{4}N_{2}}$
Formula weight	433.47	611.32	480.51	658.35
Temperature / K	200(10)	200(10)	292(4)	295(10)
Crystal system	Monoclinic	Monoclinic	Monoclinic	Monoclinic
Space group	$P2_{1}/n$	$P2_1/n$	$P2_1/c$	$P2_1/c$
<i>a</i> / nm	0.773 130(10)	0.788 51(2)	0.774 890(10)	0.793 81(11)
<i>b</i> / nm	0.940 150(10)	0.963 90(3)	0.949 070(10)	0.971 39(10)
<i>c</i> / nm	2.535 96(3)	2.619 12(7)	2.634 83(3)	2.683 2(3)
β / (°)	96.0350(10)	97.093(2)	97.3730(10)	95.920(12)
<i>V</i> / nm ³	1.833 07(4)	1.975 41(10)	1.921 70(4)	2.058 0(4)
Ζ	4	4	4	4
$D_{\rm c}$ / (Mg·m ⁻³)	1.567	2.056	1.661	2.125
μ / mm ⁻¹	7.191	11.177	14.189	17.572
<i>F</i> (000)	876.0	1 168.0	952.0	1 240.0
Crystal size / mm	0.60×0.20×0.10	0.40×0.30×0.10	0.60×0.50×0.20	0.40×0.30×0.1
θ range for data collection / (°)	3.505~73.997	3.401~65.494	3.383~72.917	3.312~74.688
Reflection collected,	10 125, 3 617	6 694, 2 984	23 088, 3 784	8 723, 3 743
unique	$(R_{int}=0.020\ 3)$	$(R_{int}=0.049\ 5)$	$(R_{int}=0.038\ 3)$	$(R_{int}=0.074 \ 9)$
Data, restraint, parameter	3 617, 0, 201	2 984, 6, 210	3 784, 6, 205	3 743, 30, 237
Goodness-of-fit on F^2	1.036	1.031	1.060	1.069
$R_1, wR_2 [I \ge 2\sigma(I)]$	0.030 1, 0.073 6	0.066 5, 0.176 8	0.031 5, 0.081 1	0.099 2, 0.262
R_1, wR_2 (all data)	0.032 6, 0.075 2	0.071 1, 0.178 8	0.034 1, 0.082 7	0.122 0, 0.283
Largest diff. peak and hole / (e•nm ⁻³)	715, -990	1 488, -926	805, -780	1 328, -545

表1	化合物1~4的晶体学参数	
AX 1		

Table 1 Crystallographic data and structure refinement for compounds 1~4

排列,形成离子型单核杂化金属卤化物,图S1为化 合物2~4的晶体结构堆积图,化合物2~4的晶体学 数据见表1,部分键长、键角见表S1,氢键数据见表 S2。采用PXRD对配合物1~4进行了相纯度测试, 分别比较配合物的测试图和单晶数据模拟的理论 图(图S2),发现主要衍射峰位置和相对强度基本一 致,证明用于性质研究的化合物1~4的晶体是纯相。

2.2 化合物1~4的光学性质

化合物 1~4 在 365 nm 紫外灯照射下均显示出 蓝色发光。图4为化合物1在荧光测试条件下的发 射光谱,其在 λ_{em} =459 nm 处显示蓝色发射,斯托克 斯位移为 79 nm(按 λ_{ex} =380 nm),同时伴有 λ_{em} =438 nm 处的小肩峰,半峰宽(full width at half-maximum) 为 100 nm。化合物1在 λ_{ex} 等于 276或 380 nm 的范 围内均能被激发,且不同的激发波长均对应着同样 的发射位置,说明化合物1只存在一个发射路径。

如图5所示,化合物1的发光寿命 τ=0.47 μs,其 微秒级的长寿命,与许多重金属配合物的磷光寿命 类似^[15],表明该发射很可能来自三重态至基态的跃 迁^[16]。图S3为化合物2~4的激发光谱、发射光谱及 衰减和拟合曲线。如图S3a和S3b所示,化合物2具 有293和374 nm的宽激发,激发峰都对应着同一个

Hydrogen bonds of N—H…Cl and C—H…Cl are indicated by turquoise and purple dashed lines, respectively

图3 化合物1的氢键

Fig.3 Hydrogen bonds of compound $\mathbf{1}$

图4 (a) 化合物1在荧光测试条件下测试的激发光谱和发射光谱; (b) 化合物1在不同激发波长下的发射光谱 Fig.4 (a) Excitation spectrum and emission spectrum tested under fluorescent test condition for compound 1; (b) Emission spectra of compound 1 at different excitation wavelengths

发射位置 λ_{m} =446 nm,斯托克斯位移为72 nm(按 λ_{m} =374 nm 计算), 半峰宽为88 nm, 发光寿命 τ=8.38 μ s。如图 S3c 和 S3d 所示, 化合物 3 在 λ_{ω} =272、379 nm 处的 2 个激发峰对应着 λ_m = 440 nm 这一相同的 发射位置,斯托克斯位移为61 nm(按λ_{ex}=379 nm 计 算),半峰宽为87 nm,其发光寿命 τ=18.38 μs。如图 S3e和S3f所示,化合物4的激发峰位于292和379 nm,2个激发峰都对应着λ_{em}=434 nm的蓝色发射,斯 托克斯位移为55 nm(按λ = 379 nm 计算), 半峰宽为 100 nm,发光寿命为11.62 µs。化合物2、3、4的发射 峰分别位于446、440和434 nm,均属于蓝光^[17-19],它 们微秒级的发光寿命远长于文献中报道的全无机 钙钛矿材料的发光寿命[20-21]。我们还计算了对应于 化合物 $1\sim4$ 发射蓝光的 CIE(x, y) 色度坐标(图 S4),分 别为(0.16, 0.15)、(0.15, 0.12)、(0.15, 0.11)和(0.16, 0.12),与文献^[22]中咪唑基有机阳离子和[CdCl_]²⁻无机 阴离子形成的有机-无机杂化物发光的 CIE 坐标 相近。

为了进一步探究化合物的发光机理,将化合物 在荧光和磷光测试条件下测试的发射光谱分别记 为F-Emission和P-Emission,分别测定了化合物1~4 的F-Emission和P-Emission,发现其发射范围基本重 合(图 S5),进一步证明化合物1~4的发射可能是由 三重态至基态跃迁产生的。

在激发光谱中,化合物1~4分别在380、374、379 和379 nm处存在尖峰,这些峰可归属为激子吸 收^[7,23-24]。由于Zn和Cd电负性较低^[25],无机阴离子的 导带较高,化合物1~4中的激子可以限域在有机分 子上,从而使化合物1~4具有相对较小的斯托克斯 位移^[26-27]。由此可以推测,化合物1~4的发光机理是 有机阳离子和无机阴离子协同作用的结果:激子通 过系间窜越(inter-system crossing, ISC)到有机部分 (H₂EDPVA)²⁺,Zn、Cd元素的重原子效应促进自旋轨 道耦合(spin-orbit coupling, SOC)、提高 ISC 效率,使 激子从三重态返回基态时产生磷光发射(图6)^[28-29]。

图 6 化合物 1~4 的发光机理 Fig.6 Luminescence mechanism of compounds 1~4

3 结 论

图5 化合物1的发光衰减和拟合曲线

Fig.5 Luminescence decay and fitted curve of compound 1

我们以(H₂EDPVA)²⁺为抗衡阳离子,以ZnX₂和 CdX₂(X=Cl、Br)为无机金属源,构筑了4个离子型单

核杂化金属卤化物(H₂EDPVA)[ZnCl₄](1)、(H₂EDPVA) [ZnBr₄](2)、(H₂EDPVA)[CdCl₄](3)和(H₂EDPVA)[CdBr₄] (4)。4个化合物均具有蓝色磷光发射的性质,相较 于传统的蓝光发射的有机化合物,化合物1~4的原 料廉价易得、合成方法简便高效,并且具有较好的 发光效果。这些化合物不仅丰富了蓝光材料家族, 在白光材料制造、生物成像和防伪安全等领域也具 有潜在的应用价值。

Supporting information is available at http://www.wjhxxb.cn

参考文献:

- [1] Zhou C K, Lin H R, Lee S J, Chaaban M, Ma B W. Mater. Res. Lett., 2018,6:552-569
- [2] Mitzi D B. J. Chem. Soc. Dalton Trans., 2001:1-12
- [3] Gautier R, Paris M, Massuyeau F. Inorg. Chem., 2020,59:2626-2630
- [4] Yum J H, Seo S Y, Lee S, Sun Y E. J. Electrochem. Soc., 2003,150: H47-H52
- [5] Zhao M, Xia Z G, Molokeev M S, Ning L X, Liu Q L. Chem. Mater., 2017,29(15):6552-6559
- [6] Guo N, Huang Y J, You H P, Yang M, Song Y H, Liu K, Zheng Y H. Inorg. Chem., 2010,49:10907-10913
- [7] Yangui A, Roccanova R, Mcwhorter T M, Wu Y T, Du M H, Saparov
 B. Chem. Mater., 2019,31(8):2983-2991
- [8] Yangui A, Pillet S, Garrot D, Triki S, Abid Y, Boukheddaden K. J. Appl. Phys., 2015,117(11):115503
- [9] Sheldrick G M. SHELXS-97, Program for Crystal Structure Solution, University of Göttingen, Germany, 1997.
- [10]Sheldrick G M. SHELXL-97, Program for the Refinement of Crystal Structures, University of Göttingen, Germany, 1997.
- [11]Krieg R, Eitner A, Günther W, Schürer C, Lindenau J, Halbhuber K J. J. Mol. Histol., 2008,39:169-191
- [12]Lacroix P G, Munoz M C, Gaspar A B, Real J A, Bonhommeau S, Rodriguez V, Nakatani K. J. Mater. Chem., 2011,21:15940-15949
- [13]Brasselet S, Cherioux F, Audebert P, Zyss J. Chem. Mater., 1999,11:

1915-1920

学

报

- [14]Vijayaraghavan R K, Gholamrezaie F, Meskers S C J. J. Phys. Chem. C, 2013,117:16820-16829
- [15]Zhou C K, Lin H R, Tian Y, Yuan Z, Clark R, Chen B H, van de Burgt L J, Wang J C, Zhou Y, Hanson K, Meisner Q J, Neu J, Besara T, Siegrist T, Lambers E, Djurovich P, Ma B W. Chem. Sci., 2018,9: 586-593
- [16]Baldo M A, O'Brien D F, You Y, Shoustikov A, Sibley S, Thompson M E, Forrest S R. *Nature*, **1998,395**:151-154
- [17]Dohner E R, Hoke E T, Karunadasa H I. J. Am. Chem. Soc., 2014, 136:1718-1721
- [18]Worku M, Tian Y, Zhou C K, Lin H R, Chaaban M, Xu L J, He Q Q, Beery D, Zhou Y, Lin X S, Su Y F, Xin Y, Ma B W. Sci. Adv., 2020, 6:eaaz5961
- [19]Fattal H, Creason T D, Delzer C J, Yangui A, Hayward J P, Ross B J, Du M H, Glatzhofer D T, Saparov B. *Inorg. Chem.*, 2021,60:1045-1054
- [20]Chen Z M, Zhang C Y, Jiang X F, Liu M Y, Xia R X, Shi T T, Chen D C, Xue Q F, Zhao Y J, Su S J, Yip H L, Cao Y. Adv. Mater., 2017, 29:1603157
- [21]Hou S C, Gangishetty M K, Quan Q M, Congreve D N. Joule, 2018,2: 2421-2433
- [22]Vassilyeva O Y, Buvaylo E A, Lobko Y V, Linnik R P, Kokozay V N, Skelton B W. RSC Adv., 2021,11:7713-7722
- [23]Chirvony V S, Martínez-Pastor J P. J. Phys. Chem. Lett., 2018,9:4955 -4962
- [24]Dammak T, Abid Y. Opt. Mater., 2017,66:302-307
- [25]Allred A L. J. Inorg. Nucl. Chem., 1961,17:215-221
- [26]Roccanova R, Houck M, Yangui A, Han D, Shi H L, Wu Y T, Glatzhofer D T, Powell D R, Chen S, Fourati H, Lusson A, Boukheddaden K, Du M H, Saparov B. ACS Omega, 2018,3:18791-18802
- [27]Lin H R, Zhou C K, Chaaban M, Xu L J, Zhou Y, Neu J, Worku M, Berkwits E, He Q Q, Lee S J, Lin X S, Siegrist T, Du M H, Ma B W. ACS Mater. Lett., 2019,1:594-598
- [28]Zhou B, Yan D P. Angew. Chem. Int. Ed., 2019,58:15128-15135
- [29]刘庆,魏振宏,于慧,郝艳欢,蔡琥. 无机化学学报, 2017, 33(11): 2139-2146
 - LIU Q, WEI Z H, YU H, HAO Y H, CAI H. Chinese J. Inorg. Chem., 2017,33(11):2139-2146