

文章编号: 1000-7032(2013)12-1596-07

Cu 掺杂天然方钠石的 VUV-Vis 发光特性

阿丽屯古丽·麦麦提纳斯尔, 穆亚斯尔·凯合日曼, 艾尔肯·斯地克*

(新疆师范大学物理与电子工程学院 新疆矿物发光材料及其微结构实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要: 采用高温固相法制备了 Cu 掺杂天然方钠石光致发光粉末。使用电子探针能谱分析(EDS)和微区分析(EPMA)测出了天然方钠石所含的主要化学成分。用 X 射线衍射(XRD)研究了 Cu 掺杂对方钠石结构的影响。室温下测量了真空紫外-紫外-可见光光谱。结果表明, 激发光谱中 171 nm 处的激发带属于基质吸收; 202, 255, 280, 290 nm 左右的激发带是 Cu^+ 离子的 $3d^{10} \rightarrow 3d^9 4s$ 跃迁引起的。Cu 在方钠石晶体中以两种位置存在, 分别为 Cu^+ 离子在 Na^+ 离子晶格位置上出现的 Cu1 位置和复合层间的 Cu2 位置, 并形成 Cu^+ 离子的 Cu1 和 Cu2 发光中心。用不同波长光激发 Cu1 和 Cu2 发光中心得到的峰值分别位于 420 nm 和 470 nm 的蓝色荧光来源于 Cu^+ 离子内的 $3d^9 4s \rightarrow 3d^{10}$ 电子跃迁。对样品的发光机理及浓度猝灭过程进行了探讨和研究。

关键词: 天然方钠石; Cu^+ 离子; 发光中心; 真空紫外光致发光光谱; 浓度猝灭

中图分类号: O482.31; O434.14 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/fgxb20133412.1596

Luminescence Properties of Cu Doped Natural Sodalite Under Ultraviolet-Vis Excitation

Alitunguli Maimaitinasiser, Muyasier Kaiheriman, Aierken Sidike*

(Key Laboratory of Mineral Luminescent Material and Microstructure of Xinjiang, School of Physics and Electronic Engineering, China Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China)

* Corresponding Author, E-mail: aierkenjiang@sina.com

Abstract: Cu doped natural sodalite phosphors were synthesized by solid-state reaction method at high-temperature. To examine chemical components of sodalite, we conducted electron probe microanalysis (EPMA) and energy dispersive spectroscopy (EDS) analysis using an electron probe scanning electron microscope spectrometer. The structure of Cu doped sodalite samples were characterized with X-ray diffraction (XRD). The VUV-Vis luminescence properties were measured at room temperature. The results show that the excitation band at 171 nm attributed to host absorption and that at 202, 255, 280, 290 nm are due to the $3d^{10} \rightarrow 3d^9 4s$ transition of Cu^+ ion. Cu existed in two lattice sites in the sodalite crystal, including Cu1 at the lattice site of Na^+ ions and Cu2 between the composite layers, and formed Cu1 and Cu2 luminescence center of Cu^+ ion, respectively. These emission spectra with the blue-ray peak at 420 nm and 470 nm, which were obtained by exciting the Cu1 and Cu2 luminescence center under different wavelength, and can be attributed to the $3d^9 4s \rightarrow 3d^{10}$ electronic transition of Cu^+ ion. The mechanism of luminescence and concentration quenching process were discussed.

Key words: natural sodalite; Cu^+ ion; luminescent center; vacuum ultraviolet photoluminescence; concentration quenching

收稿日期: 2013-08-06; 修订日期: 2013-08-26

基金项目: 国家自然科学基金(11264040); 理论物理自治区重点学科创新基金(12XSQZ0605); 新疆师范大学研究生创新基金(20131233)资助项目

作者简介: 阿丽屯古丽·麦麦提纳斯尔(1989-), 女, 新疆和田人, 主要从事固体发光材料的研究。

E-mail: altungul201@163.com

1 引 言

目前,各国都非常重视矿物功能材料的研制开发。利用天然矿物研制发光材料具有生产成本低、工艺简单、适用于多种领域等优点,有很好的应用前景^[1]。方钠石是无机功能材料领域的一种含氯的钠铝硅酸盐矿物^[2]。以硅酸盐为基质的发光材料的激发光谱的半峰全宽很大,并具有良好的化学稳定性和热稳定性,而且高纯二氧化硅原料价廉、易得,灼烧温度比铝酸盐体系低,长期以来人们都非常重视对硅酸盐掺杂发光材料的研究^[3]。方钠石的理想化学分子式是 $\text{Na}_8[\text{AlSiO}_4]_6\text{Cl}_2$, 可以用来制备光致变色材料^[4]。这是因为填了非化学计量碱金属盐的方钠石受激会产生光致变色现象^[5]。国内外有很多关于方钠石的研究。Acar 等^[6]运用水热合成法合成了 3 种类型方钠石: Chloro sodalite, Basic sodalite 和 Oxalate sodalite, 并进行了银离子交换改性研究。英国的两位科学家 Herrerros 和 Klinowski^[7]报道了硅源、铝源对水热合成方钠石的影响。Annemieke 等^[8]发现所有方钠石都有较好的吸氢性能。Aierken 等^[9]报道了在含有硫磺的天然方钠石中 S_2^- 发光中心的光致发光特性,对产自格林兰岛、加拿大、新疆等地的方钠石进行了比较研究。产自新疆的方钠石通过热处理后,发光效率比未热处理的天然方钠石增加了 7 倍。Lee T. Todd 等^[10]研究了阴极射线变色材料方钠石的发光,论述了阴极射线变色材料方钠石粉末在紫外光激发下的明亮绿色发光,这是在掺锗的方钠石样品中观察到的。

在硅酸盐晶体中掺入不同激活剂可得到多种硅酸盐发光材料。最常用的激活剂是硫,也有氧、铁和锰。这些杂质一般都能增强材料的光致变色性能^[10]。过渡金属铜是一种有效的激活剂,铜掺杂的一些基质材料呈现出有趣的光学特性^[11]。据了解,目前国内外有关人工合成方钠石方面的研究比较多,但在方钠石光致发光特性方面的研究还很少,而且 Cu 掺杂天然方钠石光致发光材料的发光特性研究尚未发现。本文为了研制新型发光材料,采用高温固相法制备了 Cu 掺杂天然方钠石的光致发光材料样品。用真空紫外-紫外-可见光测量了光致发光谱,研究了 Cu 掺杂天然方钠石发光材料的 VUV-Vis 发光特性。测量了荧光衰减曲线,分析了 Cu 掺杂天然方钠石后所

形成的发光中心种类。对样品的发光机理及浓度猝灭过程进行了研究。

2 实 验

采用高温固相法,用过渡金属元素 Cu 掺杂天然方钠石,制备出了 Cu 掺杂天然方钠石的发光材料样品。首先把天然方钠石研磨成粉末状态,然后将质量分数为 0.1% ~ 3% 的纯 Cu 粉(99.999%)混入研磨好的天然方钠石,为了 Cu 和天然方钠石能够均匀混合,将混合物再研磨一遍。然后,将混合物装入坩埚,用马弗炉在 1 000 °C 加热 1 h。取出后把坩埚放在一块铁板上使样品骤冷至室温,得到白色粉末样品。室温下把粉末样品放置在较高能量紫外光下(Hg 253.7 nm)照射,观察到样品发出非常明亮的蓝色荧光,无长余辉。在较低能量紫外光下(Hg 365.0 nm)照射不发出荧光。

用英国牛津公司生产的 2000 型电子探针扫描电镜能谱仪进行 X 射线能谱分析(EDS)和电子探针显微分析(EPMA)。在用 EPMA 和 EDS 测试之前,实验样品需磨平和擦亮。用 X 射线粉末衍射仪(D2 Phaser Bruker AXS)来表征 Cu 掺杂天然方钠石发光样品的晶体结构,并与 ICDD 卡 PDF#37-0476 进行比较分析。

光谱测量在中国科学院高能物理研究所同步辐射实验室的 VUV 实验站完成。实验站相关仪器型号如下:激发光单色器: Seya-Namioka 型光栅单色器(光栅包含角 70°); 荧光单色器:(ARC) 308 型单色器; 荧光探测器:(HAMAMATSU) H8259 型光子计数器; 计数器:(ORTEC) 974 计数器/计时器。使用 FLS920 系列稳态/瞬态荧光光谱仪(英国 Edinburgh Instrument)测量荧光寿命。

3 结果与讨论

3.1 天然方钠石的电子探针能谱分析(EDS)和微区分析(EPMA)

为了检查天然方钠石样品中所含的主要元素种类和含量,我们使用电子探针扫描电镜能谱仪进行了电子探针能谱分析(EDS)和微区分析(EPMA)。分析结果如图 1 和表 1 所示。我们所使用的天然方钠石中没有硫含量,因此,观察不到橘红色荧光。根据 Aierken 等^[9]在方钠石中 S_2^-

发光中心光致发光光谱的精细结构研究中提供的数据和结果,方钠石发出的橘黄荧光来于 S_2^- , 其特性与样品的产地无关。而本研究得到的明亮的蓝色发光,是来源于过渡金属铜掺杂天然方钠石通过热处理后所形成的 Cu^+ 离子发光中心。

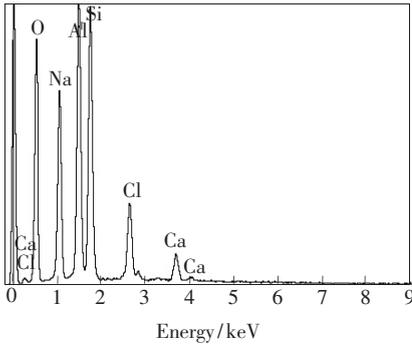


图 1 方钠石所含成分的能谱图

Fig. 1 Energy spectrum of components of natural sodalite

表 1 天然方钠石的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical components of natural sodalite (mass fraction)

谱图	O	Na	Al	Si	Cl	Ca
测量 1	45.02	16.85	14.88	16.03	6.93	0.30
测量 2	45.34	16.77	14.65	15.86	6.99	0.40
测量 3	46.89	14.37	14.79	16.64	5.32	1.99
平均	45.75	15.99	14.77	16.18	6.41	0.90
标准偏差	1.00	1.41	0.11	0.41	0.94	0.95
最大	46.89	16.85	14.88	16.64	6.99	1.99
最小	45.02	14.37	14.65	15.86	5.32	0.30

3.2 Cu 掺杂天然方钠石发光粉末样品的 XRD 结构分析

图 2 是天然方钠石和实验中获得的不同浓度的 Cu 掺杂天然方钠石发光粉末样品的 XRD 衍射谱图。该谱线的结构与标准卡片 ICDD 卡 PDF#37-0476 相一致,相应的 (hkl) 晶面参数也标在上面。从衍射图可以看出,不同掺杂浓度的 Cu 掺杂天然方钠石发光粉末样品在 (221)、(222)、(321) 和 (330) 面的相对衍射峰位置相同。衍射谱中出现的这些峰的 2θ 角分别为 24.48° , 34.89° , 37.77° 和 43.09° 。从 b ~ e 样品的 X 射线衍射图中未观察到与 Cu 相关的强衍射峰,表明 Cu 的微量掺杂不改变方钠石的晶体结构。

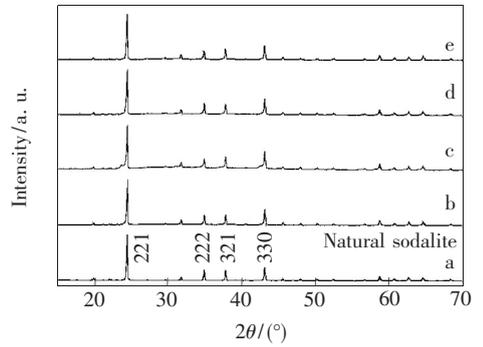


图 2 天然方钠石 (a) 和质量分数为 0.1% (b)、0.3% (c)、0.5% (d) 和 3% (e) 的 Cu 掺杂天然方钠石的 XRD 谱图。

Fig. 2 X-ray diffraction patterns of the natural sodalite (a), and 0.1% (b), 0.3% (c), 0.5% (d), 3% (e) Cu doped samples.

3.3 样品的光致发光特性

图 3 是 Cu 掺杂天然方钠石样品的激发光谱,监测波长为 420 nm 和 470 nm。用 420 nm 光监测得到的激发光谱由峰值位于 171, 200, 286 nm 左右的谱带构成,286 nm 处的强度最高。用 470 nm 光监测得到的激发光谱由峰值位于 171, 202, 255, 280, 290 nm 左右的谱带构成,202 nm 处的强度较高。构成激发光谱的各个谱带都比较宽,所以 (a) 谱线中 200 nm 左右的谱带和 (b) 谱线中 202 nm 左右的谱带可归于同一个激发带。孙力等^[12]测量了 $KCl:Cu^+$ 的吸收光谱,在 260 nm 附近的吸收谱带对应于 Cu^+ 离子的 $3d^94s \rightarrow 3d^{10}$ 跃迁吸收。我们得到的峰值 171 nm 左右的激发带归结为硅酸盐基质吸收带,峰值位于 202, 255, 280, 286, 290 nm 左右的激发带是 Cu^+ 离子吸收光发生 $3d^{10} \rightarrow 3d^94s$ 跃迁产生的^[13]。

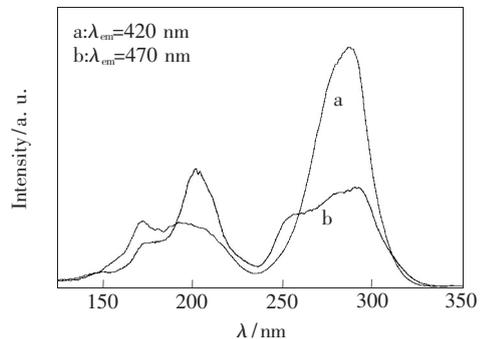


图 3 Cu 掺杂天然方钠石样品的激发光谱, $\lambda_{em} = 420, 470$ nm。

Fig. 3 Excitation spectra of Cu doped natural sodalite, $\lambda_{em} = 420, 470$ nm.

图 4 是 Cu 掺杂天然方钠石样品分别在 280 nm(a) 和 202 nm (b) 光激发下得到的发射光谱。用 280 nm 光激发, 样品的发射光谱中观察到了峰值位于 420 nm 左右的蓝色发光带; 用 202 nm 光激发, 发射光谱中出现了峰值在 470 nm 左右的蓝色发光带。至今已经有许多有关 Cu 掺杂发光材料研究的报道, 朋兴平等^[14]在 Cu 掺杂 ZnO 薄膜的 PL 谱中观察到了 410 nm 的蓝光峰, 该蓝光峰来源于 ZnO 薄膜中的 Zn 空位和 Zn 填隙缺陷, Cu 的掺入影响 ZnO 薄膜所形成的填隙缺陷浓度, 从而决定了蓝光发光带的发光强度。阿吉木等^[11]观测到了用 260 nm 光激发荧光粉 Na₂SO₄:Cu 得到的 430 nm 发射光, 该发射光被认为是 Cu⁺ 内电子的 3d⁹4s→3d¹⁰ 跃迁。S. J. Dhoble 等^[15]在 Cu⁺ 离子掺杂 KMgSO₄Cl 的光致发光特性研究中, 通过 257 nm 光激发观测到峰值在 420 nm 和 463 nm 左右的发射光谱, 并将这些蓝光峰产生的原因归结为 Cu⁺ 离子内的 3d⁹4s→3d¹⁰ 电子跃迁。本研究所得到的蓝光发射与阿吉木和 S. J. Dhoble 等人得出的结果相近, 所以我们认为 Cu 掺杂方钠石发光材料的宽带发射光谱归属于 Cu⁺ 离子内的 3d⁹4s→3d¹⁰ 电子跃迁。

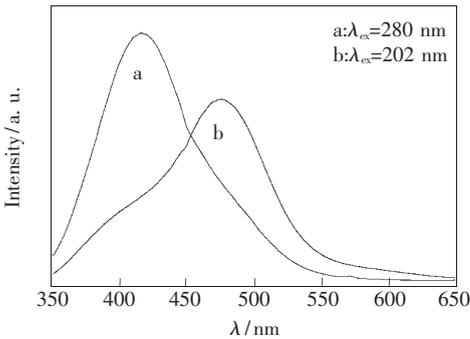


图 4 分别用 280 nm (a) 和 202 nm (b) 光激发 Cu 掺杂天然方钠石样品得到的发射光谱

Fig. 4 Emission spectra of Cu doped natural sodalite under 280 nm (a) and 202 nm (b) excitation

用不同波长光激发能够得到不同波长的发射, 这是因为晶体中存在两个发光中心。我们认为当 Cu 进入方钠石晶格时, 由于离子半径在方钠石晶体中易于形成原子缺陷, 在 Cu 掺杂天然方钠石的光致发光材料中主要以替代位杂质存在。外来掺杂原子进入晶体, 可以进入原来晶体中正常格点位置, 生成取代型的固溶体。离子尺寸直接影响掺杂原子在基质中的溶解度。从晶体

稳定的观点看, 相互替代的离子尺寸愈相近, 则固溶体愈稳定。若以 r_1 表示掺杂物的离子半径, r_2 表示被取代原子的离子半径, 一般规律如下:

$$\left| \frac{r_1 - r_2}{r_1} \right| < 15\%, \quad (1)$$

在硅酸盐材料中, 多数离子是金属氧化物, 形成固溶体主要是阳离子之间取代。根据式 (1), 可以计算出掺杂物与天然方钠石所含的主要元素中被取代离子的半径之差。方钠石晶体中只有 Na⁺ 离子的半径与 Cu⁺ 离子相近。若把上式以 D 来表示, 则 $D = 3.03\% < 15\%$ ($r_1 = r_{Na^+} (0.099 \text{ nm})$, $r_2 = r_{Cu^+} (0.096 \text{ nm})$)。因此, Cu 掺杂方钠石后取代 Na⁺ 离子的晶格位置, 形成杂质缺陷。方钠石晶体结构中引入掺杂物时, 随着正电荷的增加, 往往被含氯的钠铝硅酸盐结构中 Al³⁺ 替代 Si⁴⁺。为了保持化合物平衡, 同时在复合层间增加了一个 Cu⁺ 离子, 分子式应为 Cu₈[Cu₂AlSiO₅]₆Cl₂ 或 9CuO · 6SiO₂ · 3Al₂O₃ · CuCl₂。

因此, Cu⁺ 离子掺杂方钠石晶体后在晶体中以两种位置存在, 分别为 Cu⁺ 离子在 Na⁺ 离子晶格位置上出现的 Cu1 位置和复合层间的 Cu2 位置。发射光谱的形成可以认为当 Cu 被引入方钠石晶格时, 不同晶格位置上的 Cu⁺ 离子形成发光中心而产生的。即在 Cu1 位置上形成 Cu⁺ 离子的 Cu1 发光中心, Cu2 位置上形成 Cu⁺ 离子的 Cu2 发光中心。Cu 掺杂天然方钠石荧光粉末样品的发射光谱中峰值位于 420 nm 左右的蓝光峰, 归结为 Cu1 发光中心通过 280 nm 光激发而得到; 峰值在 470 nm 左右的蓝光峰, 归结为 Cu2 发光中心通过 202 nm 光激发而得到。晶格环境的不同对 Cu⁺ 离子的 3d⁹4s→3d¹⁰ 电子跃迁产生相

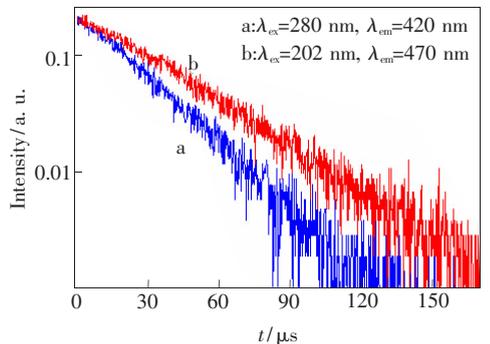


图 5 Cu 掺杂天然方钠石发光样品的荧光衰减曲线
Fig. 5 Luminescence decay curves of Cu doped natural sodalite sample

当大的影响, Cu^+ 离子在不同晶格位置上发出不同波长光的原因是其周围晶格环境不同。

图 5 中曲线 (a) 是 Cu 掺杂天然方钠石发光样品在室温下用 280 nm 光激发 420 nm 光监测得到的荧光衰减曲线, 荧光寿命为 27.7 μs ; 曲线 (b) 是通过用 202 nm 光激发 470 nm 光监测得到的荧光衰减曲线, 荧光寿命为 36.6 μs 。迄今已经有许多研究人员研究了一价铜掺杂碱金属卤化物的荧光寿命。L. Bosi 等^[16]报道了在室温条件下测量的 $\text{KCl}:\text{Cu}^+$ 的荧光寿命为 24.9 μs 。T. Kurobori 等^[17]研究了 $\text{NaCl}:\text{Cu}^+$ 的荧光寿命, 实验中用 255 nm 光激发退火样品得到由峰值 360 nm 和 420 nm 谱带构成的发射光谱; 在快速猝灭处理的样品发射谱中观察不到 420 nm, 发射谱由 360 nm 的谱带构成。T. Kurobori 把峰值在 360 nm 谱带出现的原因归结于孤立的 Cu^+ 离子, 420 nm 谱带出现的原因归结于聚合的 Cu^+ 离子。在室温下监测 360 nm 光, 退火样品的荧光寿命为 29 μs , 快速猝灭处理样品的荧光寿命为 31 μs ; 监测 420 nm 的光, 退火样品的荧光寿命为 22 μs 。本研究得到的荧光寿命与上述文献报道中 Cu^+ 离子的荧光寿命相近。用不同波长光激发得到的不同发射和荧光寿命表明, Cu 掺杂天然方钠石晶体后, 形成属于 Cu^+ 离子的两个发光中心 Cu1 和 Cu2 。荧光寿命 27.7 μs 和 36.6 μs 分别对应于 Na^+ 离子晶格位置上出现的 Cu1 发光中心和复合层间的 Cu2 发光中心。

图 6 是用不同波长光激发得到的 Cu 掺杂天然方钠石发光样品的发射光谱。由图可知, 用 202 nm 和 250 nm 光激发可以得到峰值在 470 nm

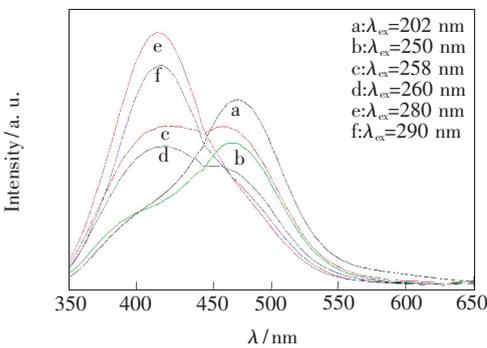


图 6 用不同波长光激发得到的 Cu 掺杂天然方钠石样品的发射光谱

Fig. 6 Emission spectra of Cu doped natural sodalite under different wavelength excitation

左右的发射光谱; 用 260, 280, 290 nm 光激发可以得到峰值在 420 nm 左右的发射光谱; 用 258 nm 光激发可以得到峰值在 425 nm 和 465 nm 的发射光谱。用不同波长光激发得到的这一系列发射光谱进一步揭示 Cu 掺杂天然方钠石晶体中确实存在两个发光中心; 而且激发光谱中 258 nm 波长以下的 255 nm 和 202 nm 左右的激发带对应于 Cu2 发光中心的激发带, 258 nm 波长以上的 280 nm 和 290 nm 左右的激发带对应于 Cu1 发光中心的激发带。

图 7 显示了涉及 Cu^+ 离子发射过程中态之间可能的电子跃迁。按照 LS 耦合法则, $3d^94s^1$ 组态中的 3d 和 4s 电子会形成 1P_1 、 1D_2 、 $^3P_{0,1,2}$ 和 $^3D_{1,2,3}$ 几种原子态。当用对应于 Cu1 发光中心的激发光激发样品时, 体系首先从基态 ($3d^{10}$ 电子组态) 激发到 $3d^94s^1$ 组态中的单一态 1D_2 , 然后通过热辐射形式电子传递到三重态, 主要传到 3P 态 ($^3E_g(T_{1g})$ 能级)。最后从能级 $^3E_g(T_{1g})$ 向基态的辐射跃迁以跃迁几率 A_1 产生。用对应于 Cu2 发光中心的激发光激发样品时, 体系首先从基态 ($3d^{10}$ 电子组态) 激发到 $3d^94s^1$ 组态中的单一态 1P_1 , 然后通过热辐射形式电子传递到三重态, 主要传到 3D 态 ($^3E_g(T_{2g})$ 能级)。从能级 $^3E_g(T_{2g})$ 向基态的辐射跃迁以跃迁几率 A_2 产生。在对应于 Cu1 发光中心的激发带中, 用 280 nm 光激发得到的发射光谱强度最大; 在对应于 Cu2 发光中心的激发带中, 用 202 nm 光激发得到的发射光谱强度最大。不同的激发波长对应于 $3d^94s^1$ 组态中不同的原子态。为了易于理解 Cu 掺杂天然方钠石发光样品的发光机理, 我们选取对应于 Cu1 发光中心和 Cu2 发光中心强度最大的激发波长 202 nm 和 280 nm

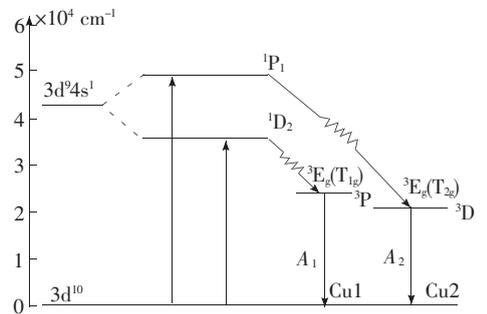


图 7 Cu^+ 离子的能级示意图, 箭头显示激发和发射跃迁。

Fig. 7 Schematic energy level of Cu^+ in the sodalite. Arrows show excitation and emission transition.

画出了 Cu^+ 离子在方钠石中可能的跃迁和能级。

3.4 掺杂浓度对发光特性的影响

图 8 是分别用 280 nm 和 202 nm 光激发得到的样品的发射光谱强度随 Cu 掺杂质量分数的变化关系, Cu 掺杂质量分数为 0.1% ~ 3%。Cu1 和 Cu2 发光中心的发光强度随着 Cu 掺杂质量分数的改变而发生变化。随着 Cu 浓度的增大, 发光强度增大; 当 Cu 质量分数增到 0.5% 时, 其强度达

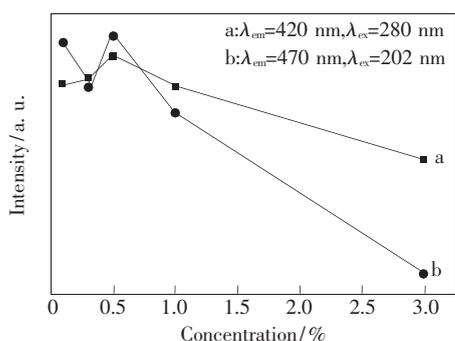


图 8 发射光谱强度随 Cu 掺杂质量分数的变化关系

Fig. 8 Emission intensity of Cu doped natural sodalite vs. different Cu mass fraction

到最大值; 继续增大 Cu 的浓度, 发光强度转而降低。这是一个浓度猝灭的过程。一般定义 Cu^+ 离子浓度猝灭点为发光强度开始下降时的浓度点, 因此 Cu1 和 Cu2 发光中心的猝灭点均为 0.5%。当 Cu^+ 离子质量分数超过 0.5% 时, 其能量即开始转移给晶体缺陷, 造成自身的发射强度降低。

4 结 论

采用高温固相法成功合成了在紫外光激发下发出明亮蓝色荧光的方钠石 $\text{Na}_8[\text{AlSiO}_4]\text{Cl}_{12}:\text{Cu}$ 发光材料。用稳态/瞬态光谱分析揭示了 Cu 在方钠石晶体中形成 Cu^+ 离子的 Cu1 和 Cu2 发光中心的发光机理。用不同波长光激发得到的 420 nm 和 470 nm 的蓝色荧光来源于 Cu^+ 离子内的 $3d^94s \rightarrow 3d^{10}$ 电子跃迁。荧光寿命 27.7 μs 和 36.6 μs 分别对应于 Cu1 和 Cu2 发光中心。随着 Cu 掺杂浓度的增加, 发射光谱中出现了浓度猝灭现象。Cu1 发光中心和 Cu2 发光中心的浓度猝灭点均为 0.5% (质量分数)。本研究得到的明亮蓝光对蓝光短波器件的制作具有重要意义。

参 考 文 献:

- [1] Yu L X, Cao L, Zhang D L. Study situation of luminescence performance of natural minerals [J]. *Chin. J. World Geology* (世界地质), 2000, 19(4):342-345 (in Chinese).
- [2] Liao S Y, Peng M S, Meng Y F. Sodalite—A natural tenebrescence mineral material [J]. *Chin. J. Mineral Petrol* (矿物岩石), 2005, 25(3):75-78 (in Chinese).
- [3] Xia W, Lei M K, Luo X X, et al. Broad excitation band alkaline-earth silicate luminescent materials activated by rare earth and its applications [J]. *Spectrosc. Spect. Anal.* (光谱学与光谱分析), 2008, 28(1):41-46 (in Chinese).
- [4] Lu G M. Study on Synthesis of Sodalite and Its Absorption Properties [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008 (in Chinese).
- [5] Duncan R C, Faughnan B W, Phillips W. Inorganic photochromic and cathodochromic recording materials [J]. *Opt.*, 1970, 9(10):2236-2243.
- [6] Acar A C, Yücel H, Culfaz A. The synthesis and sodium-silver ion exchange of sodalites [J]. *Chem. Eng. Commun.*, 2003, 190(5-8):861-882.
- [7] Herreros B, Klinowski J. Influence of the source of silicon and aluminum in the hydrothermal synthesis of sodalite [J]. *J. Chem. Soc., Faraday Transactions*, 1995, 91:1147-1154.
- [8] Van den Berg A W C, Bromley S T, Jansen J C. Thermodynamic limits on hydrogen in sodalite framework materials: A molecular mechanics investigations [J]. *Micropor. Mesopor. Mater.*, 2005, 78(1):63-71.
- [9] Sidike A, Sawuti A, Wang X M, et al. Fine structure in photoluminescence spectrum of S center in sodalite [J]. *Phys. Chem. Minerals*, 2007, 34:477-484.
- [10] Todd L T, Farrel E F, Linz A. Luminescence of cathodochromic sodalite [J]. *IEEE Transaction on Electron Device*, 1976, 23(10):1183-1184.
- [11] Abulai A, Yusufu T, Sidike A, et al. Luminescence properties of thenardite activated with Cu [J]. *Spectrosc. Spect. Anal.* (光谱学与光谱分析), 2011, 31(5):1197-1199 (in Chinese).

- [12] Sun L, Wang Y S, Zhao S L, *et al.* Photostimulated luminescence properties of KCl: Cu⁺ after UV [J]. *Spectrosc. Spect. Anal.* (光谱学与光谱分析), 2005, 25(10):1733-1735 (in Chinese).
- [13] Ni H Y, Liang H B, Liu C M, *et al.* Luminescence of Ce³⁺ ion activated sodium gadolinium pyrosilicates phosphor under vacuum ultraviolet-vis excitation [J]. *J. Chin. Rare Earth Soc.* (中国稀土学报), 2013, 31(1):38-43 (in Chinese).
- [14] Peng X P, Lan W, Tan Y S, *et al.* Photoluminescent properties of Cu⁺ doped ZnO thin films [J]. *Acta Phys. Sinica* (物理学报), 2004, 53(8):2705-2709 (in Chinese).
- [15] Dhoble S J, Gedam S C, Nagpure I M, *et al.* Luminescence of Cu⁺ in halosulphate phosphor [J]. *J. Mater. Sci.*, 2008, 43:3189-3196.
- [16] Bosi L, Gallo D, Zelada M. On the decay of KCl: Cu⁺ fluorescence [J]. *IL Nuovo Cimento*, 1996, 18(5):605-611.
- [17] Kurobori T, Taniguchi S, Takeuchi N. Lifetime of the aggregate centres in NaCl: Cu⁺ single crystals [J]. *J. Mater. Sci. Lett.*, 1992, 11(16):1140-1142.

《中国光学》征稿启事

《中国光学》,双月刊,A4开本;刊号:ISSN 2095-1531/CN22-1400/04;国内外公开发行人,邮发代号:国内12-140,国外BM6782。

- ★中国科技核心期刊
- ★中国光学学会会刊
- ★中国学术期刊(光盘版)源期刊
- ★万方数字化期刊全文数据库源期刊
- ★中国科技期刊数据库源期刊
- ★荷兰 Scopus 数据库源期刊
- ★美国《化学文摘》(CA)源期刊
- ★美国乌利希国际期刊指南(Ulrich LPD)源期刊
- ★俄罗斯《文摘杂志》(AJ)源期刊
- ★波兰《哥白尼索引》(IC)源期刊

报道内容:基础光学、发光理论与发光技术、光谱学与光谱技术、激光与激光技术、集成光学与器件、纤维光学与器件、光通信、薄膜光学与技术、光电子技术与器件、信息光学、新型光学材料、光学工艺、现代光学仪器与光学测试、光学在其他领域的应用等。

发稿类型:学术价值显著、实验数据完整的原创性论文;研究前景广阔,具有实用、推广价值的技术报告;有创新意识,能够反映当前先进水平的阶段性研究简报;对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告;以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿,洽谈合作。

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

编辑出版:《中国光学》编辑部

投稿网址: <http://www.chineseoptics.net.cn>

邮件地址: chineseoptics@ciomp.ac.cn, zggxcn@126.com

联系电话: (0431)86176852; (0431)84627061 **传 真:** (0431)84613409

编辑部地址: 长春市东南湖大路3888号(130033)

《中国光学》编辑部