

发 光 学 讲 座

第五讲 稀土发光

唐 明 道

(中国科学院长春物理研究所)

本文通过对稀土元素电子结构的特点、稀土离子在晶体中的能级跃迁及其对应的发光光谱的分析讨论,阐述了稀土发光的几个基本问题,介绍了稀土发光在科学技术、国民经济中的主要应用情况。

稀土离子在固体中的发光现象,早在 19 世纪就已被发现。长时期内由于稀土元素提取困难、价格昂贵等原因,稀土发光一直没有得到很好的发展和应用。

60 年代稀土分离提纯的突破,科技、工业、农业、人民生活发展的要求,使稀土发光的研究得到迅速的发展。特别是 1964 年前后,高效稀土红色发光材料——YVO₄:Eu 的研制成功,以及 Y₂O₃:Eu, YVPO₄:Eu, Y₂O₃S:Eu 红材料先后在彩色电视和高压水银灯中的应用并成为商品,引起了发光学界对稀土发光的重视,使稀土发光的研究和应用进入了一个新阶段。

当前,稀土发光已成为发光学的一个重要组成部分。这一方面是由于稀土发光材料已广泛应用到彩色电视、照明光源、X 光增感屏、各种显示器件等高技术领域;另一方面是这类材料同非稀土发光材料相比,更适合于开展发光学的理论研究。

一、稀土元素的电子结构^[1]

为了能清楚地了解稀土发光的特性,我们先扼要的介绍一下稀土元素的电子结构及其特点。大家知道,稀土元素最外层电子结构为

$$4f^{0-14}5d^{0-1}6s^2.$$

根据泡利原理,4f 能级最多可填到 14 个电子。从原子周期表中镧系元素系列的第二个元素 Ce 开始直到 Lu 共 14 个元素具有 4f 电子。可以说,这 14 个元素才是“名符其实”的稀土元素。

稀土元素的特点是具有 4f 电子,而且 4f 壳层被 5s²、5p⁶、6s² 壳层所屏蔽。在晶体中它们失去两个 6s 电子和一个 4f 电子而呈三价状态。三价稀土离子的 4f 能级构型和基态能级光谱项如表 1 所示。

稀土元素除具有三价离子状态外,由于 4f

表 1 三价稀土离子的 4f 能级构型和基态能级光谱项

三价稀土离子	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
4f 能级电子构型	4f ⁰	4f ¹	4f ²	4f ³	4f ⁴	4f ⁵	4f ⁶	4f ⁷	4f ⁸	4f ⁹	4f ¹⁰	4f ¹¹	4f ¹²	4f ¹³	4f ¹⁴
基态能级	¹ S ₀	² F _{7/2}	³ H ₄	⁴ I _{9/2}	⁵ I ₄	⁶ H _{5/2}	⁷ F ₀	⁸ S _{7/2}	⁷ F ₆	⁶ H _{15/2}	⁵ I ₈	⁴ I _{15/2}	³ H ₆	² F _{7/2}	¹ S ₀

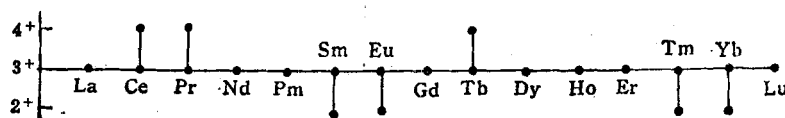


图 1 稀土元素可能存在的价态

能级上电子数目的不同,还会引起某些反常价态,各稀土元素可能具有的反常价态如图1所示。

二、稀土离子在晶体中的电子跃迁和发光^[2]

1. f—f 电子跃迁及对应的发光

晶体中三价稀土离子对激发能量的吸收和光的发射是来源于未填满的4f壳层的电子能级间的跃迁,这种跃迁就称作f—f跃迁。并不是所有的f—f跃迁都可引起发光,也不是所有的f—f跃迁都可能实现。这将取决于电偶极子、磁偶极子、电四极子跃迁的选择定则。按照宇称选择定则,电偶极子跃迁是绝对禁戒的,但是三价稀土离子在晶体结构中处于非反演对称的位置时,会产生受迫允许的电偶极子跃迁,从而引起发光。

以Eu³⁺的f—f跃迁为例^[3],Eu³⁺在NaLuO₂中处在反演对称中心,表示电偶极子跃迁的⁵D₀—⁷F₂跃迁绝对禁戒,因而所对应的发光谱线~610nm很弱。其主要发光谱线为表征磁偶极子跃迁的⁵D₀—⁷F₁所引起。在NaGdO₂中,由于Eu³⁺处在非反演对称位置,表征电偶极子跃迁的⁵D₀—⁷F₂发射就成为主要发光谱线了。(见图2)

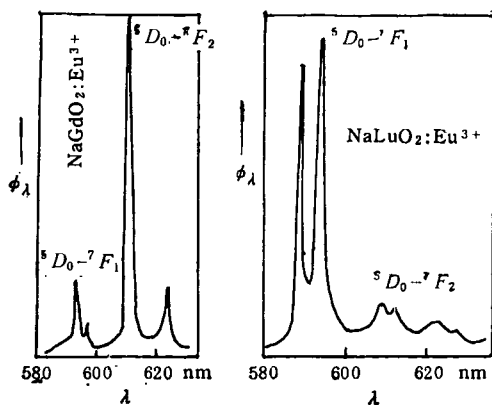


图2 Eu³⁺在NaLuO₂和NaGdO₂中的发光光谱

三价稀土离子的特性是4f层的电子被5s和5p电子层的8个电子所屏蔽。因此,周围环

物理

境(如晶体场)对f—f的跃迁影响很小。可以认为晶体中三价稀土离子的能级和自由离子近似,f—f跃迁的发光光谱均为线光谱。

在三价稀土离子中,可引起f—f跃迁及对应的发光谱线有Pr³⁺,Nd³⁺,Sm³⁺,Eu³⁺,Gd³⁺,Tb³⁺,Dy³⁺,Ho³⁺,Er³⁺,Tm³⁺,Yb³⁺。现分述如下。

Pr³⁺的发光谱线主要是³P₀—³H_{4,5,6}跃迁和³P₀—³F_{2,3,4}跃迁所引起。在YF₃:Pr³⁺中发光谱线为484.3nm(³P₀—³H₄),531.9nm(³P₀—³H₅),610.3nm(³P₀—³H₆,³F₂),704nm(³P₀—³F₃,³F₄)。

Nd³⁺其f—f跃迁对应的谱线主要为⁴F_{3/2}—⁴I_{9/2},⁴I_{11/2},⁴I_{13/2}等谱线。如用于高输出固体激光器玻璃中的Y₃Al₅O₁₂:Nd³⁺,就是利用了Nd³⁺发射的1.01μm的谱线,玻璃中Y₃Al₅O₁₂:Nd³⁺的谱线及强度比如表2所示:

表 2

谱线位置(μm)	对应跃迁	强度比(%)
0.87—0.95	⁴ F _{3/2} — ⁴ I _{9/2}	25
1.05—1.12	⁴ F _{3/2} — ⁴ I _{11/2}	60
~1.34	⁴ F _{3/2} — ⁴ I _{13/2}	15

Sm³⁺的f—f跃迁对应的发射谱线主要在红橙区,~610nm线对应于⁴G_{5/2}—⁶H_{7/2},~650nm谱线对应于⁴G_{5/2}—⁶H_{9/2}。

Eu³⁺是研究最多、应用最广泛的一种三价稀土离子。它的f—f跃迁主要是⁵D₀—⁷F₀₋₆,所产生的谱线有~813nm(⁵D₀—⁷F₆),~741nm(⁵D₀—⁷F₅),~700nm(⁵D₀—⁷F₄),~654nm(⁵D₀—⁷F₃),~610nm(⁵D₀—⁷F₂),~592nm(⁵D₀—⁷F₁),~578nm(⁵D₀—⁷F₀)。如何能获得高效的⁵D₀—⁷F₂跃迁所引起的发射谱线,是研究Eu³⁺发光的重要课题。

Gd³⁺的4f最低激发能级是⁶P_{7/2}(能级对应的能量为32×10³cm⁻¹),因此其发光谱线最为简单,通常仅有⁶P_{7/2}—⁸S_{7/2}跃迁所对应的~315nm谱线。

Tb³⁺也是一类重要的三价稀土离子,其

f-f 跃迁所对应的谱线最丰富。在晶体中的 f-f 跃迁主要是 $^3D_4-^7F_6$ 跃迁, 对应的发射谱线分别是: 475—510nm ($^3D_4-^7F_6$), 535—565nm ($^3D_4-^7F_5$), 578—600nm ($^3D_4-^7F_4$), 615—635nm ($^3D_4-^7F_3$), 650—665nm ($^3D_4-^7F_2$) 等。其中 $^3D_4-^7F_5$ 跃迁对应的 535—565nm 谱线是 Tb^{3+} 的主要发光谱线。由于其位置接近人眼视见函数的最大值, 因而 Tb^{3+} 激活的发光材料已在阴极射线管、X 光增感屏、照明光源中得到广泛应用。

Dy^{3+} 的 f-f 跃迁所对应的谱线分布在两个区域, 一个在蓝绿区的 470—500nm, 对应的跃迁为 $^4F_{9/2}-^6H_{15/2}$, 一个在橙红区的 570—600nm, 对应 $^4F_{9/2}-^6H_{13/2}$ 跃迁。

Ho^{3+} 的 f-f 跃迁引起的谱线主要是 545nm ($^5S_2-^5I_8$), 此外还有 413nm ($^5G_5-^5I_8$), ~ 460 nm ($^3M_{10}-^5I_2$), 和 ~ 510 nm ($^3M_{10}-^5I_4$)。

Er^{3+} 的 f-f 跃迁对应的谱线主要在绿区的 ~ 540 nm ($^4S_{3/2}-^4I_{15/2}$)。

Tm^{3+} 的发射谱线在蓝区的 ~ 450 nm ($^1D_0-^3H_4$) 和 ~ 480 nm ($^1G_4-^3H_6$), 是一类重要的蓝色发光材料。

Yb^{3+} 的发射在近红外区 ~ 950 nm ($^3F_{7/2}-^3F_{7/2}$)。

概括三价稀土离子 f-f 跃迁引起的发光光谱的特征是: (1) 光谱呈线状; (2) 基质对谱线位置影响不大, 对不同能级跃迁几率有影响; (3) 在可见区的谱线丰富, 发光颜色鲜艳。

2. f-d 跃迁及对应的发光

三价稀土离子除了 f-f 跃迁, 还有三价和二价稀土离子的 f-d 跃迁。f-d 跃迁是指一个 4f 电子上升到较高的 5d 能级, 形成的 $4f^n-4f^{n-1}5d$ 的电子跃迁。这种跃迁与 f-f 跃迁的一个重大差别是, 由于一个 4f 电子在 5d 轨道上, 因此电子由 $4f^{n-1}5d$ 向 $4f^n$ 跃迁产生的光谱全强烈地受晶体场的影响。

三价稀土离子中, Ce^{3+} , Tb^{3+} , Pr^{3+} , Eu^{3+} 都存在 5d 能级。其中 Tb^{3+} , Pr^{3+} , Eu^{3+} 的 5d 能级位置高, 难以实现 f-d 跃迁。 Ce^{3+} 则不

同, 其 5d 能级在三价稀土离子中最低, 可产生 f-d 跃迁。 Ce^{3+} 的基态为 4f 的 $^2F_{7/2}$, 其 f-d 跃迁所引起发光光谱是宽谱带。谱带位置明显受晶场的影响, 随基质的不同, 其谱带位置可在 320—550nm 范围内变化。

需要指出的是 Ce^{3+} 不仅具有 f-d 跃迁, 而且其 5d 能级的能量可有效的传递给 Tb^{3+} 的 5D_4 能级, 增强 Tb^{3+} 的 $^5D_4-^7F_5$ 的发光谱线。

Eu^{2+} 是 f-d 跃迁另一典型代表。其 $4f^65d$ 能级最低位置在 $\sim 27500cm^{-1}$, 基态的光谱项为 $^8S_{7/2}$ 。f-d 跃迁产生的发光光谱为宽带, 其位置强烈受晶场的影响。在不同基质中, 其谱带位置可在 360—585nm 范围内改变, 这就为 Eu^{2+} 激活的发光材料提供了广泛的应用范围。

f-d 跃迁是允许跃迁, 吸收强度比 f-f 跃迁大四个数量级, 因而荧光寿命比 f-f 跃迁短得多。

值得提出的是 Ce^{3+} 、 Eu^{2+} 不仅有结构灵敏的 f-d 跃迁, 而且还存在结构不灵敏的 f-f 跃迁。只是在室温下很难观察到它们的 f-f 跃迁所引起的线谱。

和 f-d 跃迁相应的还有电荷迁移跃迁, 即围绕晶格阳离子的一个电子跃迁到稀土离子的 4f 能级, 就称作电荷迁移跃迁。以 Tb^{3+} 为例, 一个电子被激发到 $4f^75d$ 能级后, 可发生向 $4f^8$ 能级的无辐射跃迁, 这种跃迁也发光, 就被称为电荷迁移跃迁所引起的发光。

f-d 跃迁产生的发光光谱的特点是: (1) 光谱为带谱。(2) 发光带位置强烈地受基质晶格的影响。(3) 发射强度比 f-f 跃迁引起的谱线强。(4) 价态不易稳定。

三、稀土离子发光的几个基本问题

1. 能量传递^[3]

发光学三个基本过程是吸收激发能、能量传输到发光中心、发光中心发出辐射光。

能量传输就是指, 发光材料受到外界能量激发后到产生光辐射以前激发能量在晶体中的传输现象。在研究发光现象时, 可发现到材料

中吸收激发能和发射光并不是由同一中心产生,因此这两部分必然存在着能量传输过程。

能量传输包括能量传递和输运两种不同的过程。能量传递是指某一激发中心把激发能全部或部分交给另一发光中心的过程。能量输运是指借助电子、空穴、激子等的运动把激发能从一部分带到另一部分的过程。

能量传输大致有四种方式:再吸收、共振传递、载流子的能量传输和激子的能量输运。就稀土离子来说,能量传输主要是通过共振传递来实现的。三价稀土离子的 f-f 跃迁为禁戒跃迁,对激发能吸收小、发光弱,能量传递就具有更重要的意义和作用。

稀土离子中能量传递的最终效果是使发光中心的发光增强,这一现象就叫作敏化发光。也有把一种杂质中心吸收能量传递到另一中心使其发光增强的现象叫作杂质敏化。最近十几年来,发现了很多稀土离子之间存在着杂质敏化发光现象,如 $Ce^{3+}-Tb^{3+}$, $Gd^{3+}-Eu^{3+}$, $Er^{3+}-Tm^{3+}$, $Er^{3+}-Ho^{3+}$, $Tm^{3+}-Ho^{3+}$, $Yb^{3+}-Er^{3+}$, $Yb^{3+}-Ho^{3+}$ 等,其中 $Ce^{3+}-Tb^{3+}$ 间的能量传递是一典型例子。 Tb^{3+} 在许多基质中很少或不吸收激发能量,因而难以实现 Tb^{3+} 的绿色发光。当在基质中引入敏化中心 Ce^{3+} 后,由于 Ce^{3+} 可强烈吸收激发能并有效传递给 Tb^{3+} ,从而可获得高效的 Tb^{3+} 的绿色发光。

稀土离子能量传递的类型和机理中最常见和应用最多的是共振传递和借助声子协助的能量传递。图 3 给出了能量传递过程的示意图。

如图所示,敏化中心(S)的电子吸收激发

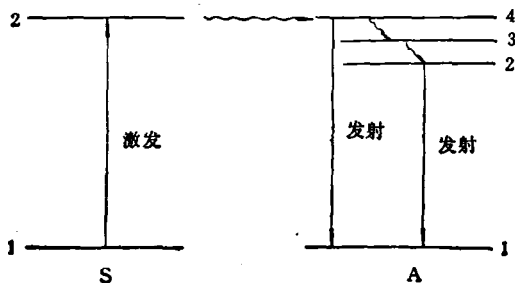


图 3 能量传递过程示意图

能后,从基态(S_1)激发到激发态(S_2),然后把能量传到发光中心(A)的激发态(A_4),由 A_4 可直接跃迁到基态 A_1 ,也可能经无辐射跃迁到激发态(A_2),再由 A_2 到基态 A_1 产生 A 的光辐射。前一种跃迁(A_4-A_1)是共振传递,后一种跃迁(A_2-A_1)就是借助声子协助而实现的能量传递。

2. 基质晶格的影响和作用

基质晶格对 f-f 跃迁的影响表现在三个方面。

(1) 可改变三价稀土离子在晶体场所处位置的对称性,使不同跃迁的谱线强度发生明显的变化。如上面已谈到的 Eu^{3+} 在 $NaLuO_2$ 中处在反演对称位置,其发光谱线主要是 ${}^3D_0-{}^7F_1$ 的发射。在 $NaGdO_2$ 中处于没有反演对称位置,原为禁戒跃迁的 ${}^3D_0-{}^7F_2$ 变为允许跃迁,其发光谱线就主要由 ${}^3D_0-{}^7F_2$ 的 $\sim 613nm$ 所组成。

(2) 可影响某些能级的分裂。如 Eu^{3+} 的 ${}^3D_0-{}^7F_1$ 跃迁在 $NaGdO_2$ 中产生一条谱线,在 $NaLuO_2$ 中就分裂为两条谱线。

(3) 某些基质的阴离子团可吸收激发能量并传递给稀土离子而使其发光,即基质中的阴离子团起敏化中心的作用。基质中的 TiO_4^{4-} , VO_4^{3-} , PO_4^{3-} 等阴离子团的吸收系数大,发射带宽又位于近紫外区,和稀土离子的吸收能级相重合,因而对稀土离子的发光能起着敏化的作用。特别是阴离子团的中心原子(Me)和介于中间的氧离子 O^{2-} 以及取代基质中阳离子位置的稀土离子(RE)形成一直线,即 $Me-O-RE$ 接近 $180^\circ C$ 时,基质阴离子团对稀土离子的能量传递最有效。

基质的阴离子团对稀土离子敏化发光的典型例子是 $YVO_4:Eu^{3+}$, VO_4 中的 V-O 对短波紫外线吸收能力强,发射光谱的峰值在 $450nm$ 附近,与 Eu^{3+} 的吸收几乎重叠, V-O-Y(Eu) 角为 $170^\circ C$,从而使 Eu^{3+} 实现了高效发光。

基质晶格对 f-d 跃迁的光谱位置有着强烈的影响。表 3,表 4 分别给出了 Ce^{3+} , Eu^{2+} 在不同基质中的发光带的位置。

表3 Ce³⁺在不同基质中的谱带位置

基 质	YPO ₄	Y ₂ SiO ₅	CaGa ₂ SO ₄	Ba ₂ SiO ₄	Y ₃ Al ₅ O ₁₂
Ce ³⁺ 带位置 (nm)	320	410	455	442	550

表4 Eu²⁺在不同基质中的谱带位置

基 质	Eu ²⁺ 带位置(nm)
SrBe ₂ Si ₂ O ₇	360
BaMg ₂ Si ₂ O ₇	400
(BaSr) ₃ (PO ₄) ₂	410
Ca ₃ P ₂ O ₇	415
α-Sr ₂ P ₂ O ₇	420
3Sr ₂ (PO ₄) ₂ · SrCl ₂	450
StAl ₃ O ₇	520
Sr ₅ (PO ₄) ₂ SiO ₄	585

四、稀土发光的应用

1. 在测定镧系元素微量杂质上的应用^[4]

三价稀土离子的发光光谱由锐谱线组成,分布在从紫外、可见到红外的宽阔波段范围内,而且各稀土离子的主要特征谱线互不重叠。人们正是利用这些特点,选用各三价稀土离子的特征谱线,确定其发光强度随浓度变化的关系来实现镧系元素微量杂质的测定。人们把这一分析方法称作固体发光分析法。其特点是灵敏度高(10⁻⁴—10⁻⁷%),可分析除 Pm 以外的由 Ce 到 Yb 的 12 个镧系元素,而且测试设备简单,容易建立。

这一分析方法的特征谱线(或称分析谱线)依据稀土发光材料中镧系离子发光光谱研究已取得的结果来选取。目前已用来分析的稀土发光材料有十几种,如 Y, Gd, Lu, Sc 的钒酸盐; Y, Sc 的磷酸盐, Y, La 的卤氧化物; Y, Gd, Ce 的氧化物等。镧系离子的特征谱线选用的有: Ce³⁺ 的 ~356nm, Pr³⁺ 的 244 和 ~500nm 谱线, Nd³⁺ 的 ~900nm 谱线, Sm³⁺ 的 ~560 和 ~601nm 谱线, Eu³⁺ 的 ~590 和 619nm 谱线, Gd³⁺ 的 ~313nm 谱线, Tb³⁺ 的 ~545nm 谱线, Dy³⁺ 的 ~575nm 谱线, Ho³⁺ 的 ~540nm 谱线, Er³⁺ 的 ~552nm 谱线, Tm³⁺ 的 ~460nm 谱线,

Yb³⁺ 的 ~985nm 谱线。

2. 在显象显示器件上的应用^[5]

首先是在彩色电视显象管上的应用。1964 年前后研制出了 Y₂O₃:Eu³⁺ 和 Y₂O₂S:Eu³⁺ 红色发光材料。尽管其能量效率比原用红色发光材料 ZnCdS:Ag 低,但由于 Eu³⁺ 的发射谱线窄,色纯度高,可获得比 ZnCdS:Ag 高的流明效率,因而使 Y₂O₃:Eu³⁺ 和 Y₂O₂S:Eu³⁺ 一问世,就取代 ZnCdS:Ag 作为彩色电视显象管的标准红基色并一直沿用至今。为稀土的应用提供了最大市场。

对于彩色投影电视显象管,由于电流密度大,因此硫化物型的蓝、绿色发光材料的电流特性、稳定性均不能满足要求,现在也被蓝、绿色稀土发光材料所代替。

商业机器、计算机显示、光光学字母辨认机、飞机仪表用座舱显示器、示波器监控器、投影机等显示器件上的特殊阴极射线管所用的发光材料,要求在高电流密度激发下具有良好的线性特性和高亮度。原用的硫化物型发光材料也不能满足要求,现已被不少型号的稀土发光材料(如 Y₂O₂S:Tb³⁺, La₂O₂S:Tb³⁺, Gd₂O₂S:Tb³⁺, Y₂SiO₅:Ce³⁺, Y₃Al₅O₁₂:Ce³⁺ 等)取代。

X 射线增感屏已往的发光材料是 CaWO₄。用稀土发光材料代替具有同样的成象效果,而且可使病人接收 X 射线照射剂量减少 50%。采用稀土发光材料提高了图象清晰度,延长了 X 射线管寿命,降低了 X 射线诊断所需电能且拍片成功率提高。蓝色增感屏用的稀土发光材料有 LaOBr:Tb³⁺, BaFCl:Eu²⁺, Y₂O₂S:Tb³⁺。绿色增感屏用有 Gd₂O₂S:Tb³⁺, La₂O₂S:Tb³⁺。

3. 在照明光源上的应用^[6]

稀土发光材料在照明光源上最重要的应用是三基色荧光灯和紧凑型荧光灯。

1974 年荷兰科学家研制成 CeMgAl₁₁O₁₉:

Tb³⁺ 绿粉、BaMg₂Al₁₆O₂₇:Eu²⁺ 蓝粉加上Y₂O₃:Eu³⁺ 红粉按一定比例混合制成的40W 荧光灯,灯的光效可达80lm/W,平均显色指数 R_a—85。同已往的非稀土发光材料——卤磷酸钙荧光粉制灯相比,光效提高近13%,R_a增加10。三基色稀土发光材料的研究和应用,使荧光灯的发展进入一个新阶段,三基色荧光灯曾在美国被评为十大科技新产品的一种。由于三基色稀土材料价格昂贵,短时期内尚无法取代卤磷酸钙荧光粉。

70年代后期,综合荧光灯高光效和白炽灯使用方便而研制出的新型节电光源——紧凑型荧光灯,由于管径缩小,紫外线密度增大,工作温度升高,所用发光材料只有三基色稀土发光材料可基本满足要求。这种灯的最大优点是节电,一支9W灯的光通量和40至50W白炽灯相当,寿命也提高五倍,许多国家及我国为节约能源已逐步用紧凑型荧光灯来代替白炽灯,从而也促进了稀土发光材料研究的继续发展。已开发的新型稀土发光材料有:3(SrBa)₃(PO₄)₂·SrCl₂:Eu²⁺, 2(SrO)·0.84P₂O₅·0.16B₂O₃:Eu²⁺

(蓝粉)以及GdMgB₃O₁₀:Ce³⁺·Tb³⁺·Y₂SiO₅:Ce³⁺·Tb³⁺, LaPO₄:Ce³⁺·Tb³⁺(绿粉)。如何降低稀土发光材料的成本,扩展其应用范围,已成为各国科学家所关注的一个问题。

稀土发光材料另一方面的重要应用是改进水银荧光灯的显色性和提高光效上,用铕激活的钒磷酸钪红粉代替已往的氟锆酸镁锰、磷酸镁锰红粉,制出的400W水银荧光灯,光效由原来的40—50lm/W提高为55lm/W, R_a由35—42提高到44。

稀土发光在激光、生物、医学上也得到广泛的应用,限于篇幅这里就不一一介绍了。

- [1] 赫·姆·米纳切夫等著,刘恒潜译,稀土在催化中的应用,科学出版社,(1987),3。
 [2] 荧光体同学会编,荧光体ハンドブック,オーム社,(1987),116。
 [3] G. Blasse, Analysis & Application of Rare Earth materials, Ed. O. B. Michelsen, Universitetsforlaget (1973), 213。
 [4] 唐明道,郭常新,国外发光与电光, No. 5 (1978), 22。
 [5] J. E. Mathers, Analysis & Application of Rare Earth materials, Ed. O. B. Michelsen, Universitetsforlaget (1973), 241, 359。
 [6] 唐明道,发光快报, No. 1—2 (1989), 1。

向您推荐《中国物理文摘》

《中国物理文摘》(双月刊)是由中国科学院文献情报中心和中国科学院物理学情报网主办、经国家科委批准的国家一级检索期刊。

该刊宗旨是:报道我国最新的物理研究成果与进展,沟通国内信息,促进我国物理学研究工作发展,为“四化”建设服务。

该刊收录国内(包括港、台地区)物理学正式出版物中的科研论文,也有我国科研人员在国外发表的物

理学论文。在选题上力求结合科研和生产的实际,为便于国际交际,该刊采用“国际物理学分类表”分类,并按国家标准局颁布的有关国家标准著录。为了扩大检索途径,从1989年起又增加了主题标引项目。

该刊创办于1986年,目前已出至第5卷,每期报道文摘约900条。国内统一刊号CN11-1880,读者可在附近邮局订阅,邮发代号为6-46。

(姚国昌)

(上接第355页)

1193.
 [9] H. Lengfellner et al., *J. Phys. D*, 22 (1989), 323.
 [10] Q. Y. Ying et al., *Appl. Phys. Lett.*, 53(1988), 1762.
 [11] S. Miura et al., *Appl. Phys. Lett.*, 52(1988), 1008.
 [12] H. S. Kwok et al., *Appl. Phys. Lett.*, 52(1988), 1825.
 [13] B. Roas et al., *Appl. Phys. Lett.*, 52(1988), 1557.
 [14] S. Witanachchi et al., *Appl. Phys. Lett.*, 53(1988),

234.
 [15] J. Fröhlingsdorf et al., *Solid State Commun.*, 67 (1988), 965.
 [16] A. M. Desantolo et al., *Appl. Phys. Lett.*, 52 (1988), 1995.
 [17] G. Koren et al., *Appl. Phys. Lett.*, 54(1989), 1928
 [18] G. Koren et al., *Appl. Phys. Lett.*, 54(1989), 1054.
 [19] S. H. Liou et al., *Appl. Phys. Lett.*, 54(1989), 760.