



国家出版基金资助项目

“新闻出版改革发展项目库”入库项目

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

中国稀土科学与技术丛书 主 编 干 勇
执行主编 林东鲁

稀土发光材料

Rare Earth Luminescent Materials

洪广言 庄卫东 主编



冶金工业出版社
www.cn mip.com.cn



国家出版基金资助项目

“新闻出版改革发展项目库”入库项目

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

中国稀土科学与技术丛书

主 编 干 勇
执行主编 林东鲁

稀土发光材料

洪广言 庄卫东 主编

北 京

冶金工业出版社

2016

内 容 提 要

本书是《中国稀土科学与技术丛书》之一，由多位经验丰富的专家学者针对当前稀土发光材料的发展趋势及现状归纳总结而成。本书在阐述稀土发光材料知识的基础上，较全面系统地介绍了稀土离子的光谱特性、灯用稀土发光材料、白光 LED 用稀土发光材料、高压汞灯和金属卤化物灯用稀土发光材料、稀土长余辉发光材料、真空紫外用稀土发光材料、稀土闪烁材料、稀土配合物发光材料以及稀土纳米发光材料等各种稀土发光材料的进展。

本书可供从事稀土荧光粉科研、生产的相关人员阅读，也可供大专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

稀土发光材料/洪广言, 庄卫东主编. —北京: 冶金工业出版社, 2016. 5

(中国稀土科学与技术丛书)

ISBN 978-7-5024-7132-3

I. ①稀… II. ①洪… ②庄… III. ①稀土族—发光材料 IV. ①TB39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 214713 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp. com. cn 电子信箱 yjcs@cnmp. com. cn

丛书策划 任静波 肖 放

责任编辑 张熙莹 肖 放 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 孙跃红 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7132-3

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 固安华明印业有限公司印刷

2016 年 5 月第 1 版, 2016 年 5 月第 1 次印刷

169mm × 239mm; 21. 75 印张; 419 千字; 326 页

86. 00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp. com. cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs. tmall. com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

《中国稀土科学与技术丛书》

编辑委员会

主 编 千 勇

执行主编 林东鲁

副 主 编 严纯华 张洪杰 李 卫 张安文

黄小卫 杨占峰

编 委 (按姓氏笔画排序)

千 勇 牛京考 古宏伟 卢先利 卢冠忠

朱明刚 任国浩 庄卫东 闫阿儒 闫慧忠

关成君 严纯华 李 卫 李永绣 李春龙

李星国 李振民 李维民 杨占峰 肖方明

吴晓东 何 洪 沈宝根 张安文 张志宏

张国成 张洪杰 陈占恒 陈耀强 林东鲁

孟 健 郝 茜 胡伯平 姜连升 洪广言

都有为 贾银松 徐时清 徐怡庄 高 松

郭 耘 黄小卫 黄春辉 屠海令 蒋利军

谭学余 潘裕柏

秘 书 组 张 莉 李 平 石 杰 韩晓英 祝 捷

孙菊英 刘一力 王 勇

序

稀土元素由于其结构的特殊性而具有诸多其他元素所不具备的光、电、磁、热等特性，是国内外科学家最为关注的一组元素。稀土元素可用来制备许多用于高新技术的新材料，被世界各国科学家称为“21世纪新材料的宝库”。稀土元素被广泛应用于国民经济和国防工业的各个领域。稀土对改造和提升石化、冶金、玻璃陶瓷、纺织等传统产业，以及培育发展新能源、新材料、新能源汽车、节能环保、高端装备、新一代信息技术、生物等战略新兴产业起着至关重要的作用。美国、日本等发达国家都将稀土列为发展高新技术产业的关键元素和战略物资，并进行大量储备。

经过多年发展，我国在稀土开采、冶炼分离和应用技术等方面取得了较大进步，产业规模不断扩大。我国稀土产业已取得了四个“世界第一”：一是资源量世界第一，二是生产规模世界第一，三是消费量世界第一，四是出口量世界第一。综合来看，目前我国已是稀土大国，但还不是稀土强国，在核心专利拥有量、高端装备、高附加值产品、高新技术领域应用等方面尚有差距。

国务院于2015年5月发布的《中国制造2025》规划纲要提出力争通过三个十年的努力，到新中国成立一百年时，把我国建设成为引领世界制造业发展的制造强国。规划明确了十个重点领域的突破发展，即新一代信息技术产业、高档数控机床和机器人、航空航天装备、海洋工程装备及高技术船舶、先进轨道交通装备、节能与新能源汽车、电力装备、农机装备、新材料、生物医药及高性能医疗器械。稀土在这十个重点领域中都有十分重要而不可替代的应用。稀土产业链从矿石到原材料，再到新材料，最后到零部件、器件和整机，具有几倍，甚至百倍的倍增效应，给下游产业链带来明显的经济效益，并带来巨

大的节能减排方面的社会效益。稀土应用对高新技术产业和先进制造业具有重要的支撑作用，稀土原材料应用与《中国制造2025》具有很高的关联度。

长期以来，发达国家对稀土的基础研究及前沿技术开发高度重视，并投入很多，以期保持在相关领域的领先地位。我国从新中国成立初开始，就高度重视稀土资源的开发、研究和应用。国家的各个五年计划的科技攻关项目、国家自然科学基金、国家“863计划”及“973计划”项目，以及相关的其他国家及地方的科技项目，都对稀土研发给予了长期持续的支持。我国稀土研发水平，从跟踪到并跑，再到领跑，有的学科方向已经处于领先水平。我国在稀土基础研究、前沿技术、工程化开发方面取得了举世瞩目的成就。

系统地总结、整理国内外重大稀土科技进展，出版有关稀土基础科学与工程技术的系列丛书，有助于促进我国稀土关键应用技术研发和产业化。目前国内外尚无在内容上涵盖稀土开采、冶炼分离以及应用技术领域，尤其是稀土在高新技术应用的系统性、综合性丛书。为配合实施国家稀土产业发展策略，加快产业调整升级，并为其提供决策参考和智力支持，中国稀土学会决定组织全国各领域著名专家、学者，整理、总结在稀土基础科学和工程技术上取得的重大进展、科技成果及国内外的研发动态，系统撰写稀土科学与技术方面的丛书。

在国家对稀土科学技术研究的大力支持和稀土科技工作者的不断努力下，我国在稀土研发和工程化技术方面获得了突出进展，并取得了不少具有自主知识产权的科技成果，为这套丛书的编写提供了充分的依据和丰富的素材。我相信这套丛书的出版对推动我国稀土科技理论体系的不断完善，总结稀土工程技术方面的进展，培养稀土科技人才，加快稀土科学技术学科建设与发展有重大而深远的意义。

中国稀土学会理事长
中国工程院院士



2016年1月

编者的话

稀土元素被誉为工业维生素和新材料的宝库，在传统产业转型升级和发展战略新兴产业中都大显身手。发达国家把稀土作为重要的战略元素，长期以来投入大量财力和科研资源用于稀土基础研究和工程化技术开发。多种稀土功能材料的问世和推广应用，对以航空航天、新能源、新材料、信息技术、先进制造业等为代表的高新技术产业发展起到了巨大的推动作用。

我国稀土科研及产品开发始于 20 世纪 50 年代。60 年代开始了系统的稀土采、选、冶技术的研发，同时启动了稀土在钢铁中的推广应用，以及其他领域的应用研究。70 ~ 80 年代紧跟国外稀土功能材料的研究步伐，我国在稀土钐钴、稀土钕铁硼等研发方面卓有成效地开展工作，同时陆续在催化、发光、储氢、晶体等方面加大了稀土功能材料研发及应用的力度。

经过半个多世纪几代稀土科技工作者的不懈努力，我国在稀土基础研究和产品开发上取得了举世瞩目的重大进展，在稀土开采、选冶领域，形成和确立了具有我国特色的稀土学科优势，如徐光宪院士创建了稀土串级萃取理论并成功应用，体现了中国稀土提取分离技术的特色和先进性。稀土采、选、冶方面的重大技术进步，使我国成为全球最大的稀土生产国，能够生产高质量和优良性价比的全谱系产品，满足国内外日益增长的需求。同时，我国在稀土功能材料的基础研究和工程化技术开发方面已跻身国际先进水平，成为全球最大的稀土功能材料生产国。

科技部于 2016 年 2 月 17 日公布了重点支持的高新技术领域，其中与稀土有关的研究包括：半导体照明用长寿命高效率的荧光粉材料、半导体器件、敏感元器件与传感器、稀有稀土金属精深产品制备技术，超导材料、镁合金、结构陶瓷、功能陶瓷制备技术，功能玻璃制备技术，新型催化剂制备及应用

技术，燃料电池技术，煤燃烧污染防治技术，机动车排放控制技术，工业炉窑污染防治技术，工业有害废气控制技术，节能与新能源汽车技术。这些技术涉及电子信息、新材料、新能源与节能、资源与环境等较多的领域。由此可见稀土应用的重要性和应用范围之广。

稀土学科是涉及矿山、冶金、化学、材料、环境、能源、电子等的多专业的交叉学科。国内各出版社在不同时期出版了大量稀土方面的专著，涉及稀土地质、稀土采选冶、稀土功能材料及应用的各个方向和领域。有代表性的是1995年由徐光宪院士主编、冶金工业出版社出版的《稀土（上、中、下）》。国外有代表性的是由爱思唯尔（Elsevier）出版集团出版的“Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths”（《稀土物理化学手册》）等，该书从1978年至今持续出版。总的来说，目前在内容上涵盖稀土开采、冶炼分离以及材料应用技术领域，尤其是高新技术应用的系统性、综合性丛书较少。

为此，中国稀土学会决定组织全国稀土各领域内著名专家、学者，编写《中国稀土科学与技术丛书》。中国稀土学会成立于1979年11月，是国家民政部登记注册的社团组织，是中国科协所属全国一级学会，2011年被民政部评为4A级社会组织。组织编写出版稀土科技书刊是学会的重要工作内容之一。出版这套丛书的目的，是为了较系统地总结、整理国内外稀土基础研究和工程化技术开发的重大进展，以利于相关理论和知识的传播，为稀土学界和产业界以及相关产业的有关人员提供参考和借鉴。

参与本丛书编写的作者，都是在稀土行业内有多年经验的资深专家学者，他们在百忙中参与了丛书的编写，为稀土学科的繁荣与发展付出了辛勤的劳动，对此中国稀土学会表示诚挚的感谢。

中国稀土学会
2016年3月

前 言

稀土发光材料是最重要的稀土功能材料之一，主要应用于节能灯、半导体照明、平板显示、闪烁晶体等领域，已成为节能照明、信息显示、光电探测等领域的支撑材料之一，为科技进步和社会发展发挥着日益重要的作用。

稀土离子的发光特性主要取决于稀土离子 $4f$ 壳层电子的性质。随着 $4f$ 壳层电子数的变化，稀土离子表现出不同的电子跃迁形式和极其丰富的能级跃迁。因而，稀土离子可以吸收或发射从紫外到红外光区的各种波长的光而形成多种多样的发光材料。稀土离子的优异发光特性为利用其制作高效发光材料奠定了基础。

稀土发光材料曾在发光学和发光材料的发展中起着里程碑的作用：1908 年 Becquerel 发现稀土锐吸收谱线；1959 年发现用 Yb^{3+} 作敏化剂， Er^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Tm^{3+} 作激活剂的光子加和现象，为上转换材料研发奠定基础；1964 年 $\text{YVO}_4:\text{Eu}^{3+}$ 和 $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ 及 1968 年 $\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Eu}^{3+}$ 等彩色电视机用红色粉的出现，使彩色电视机的亮度提高到了一个水平；20 世纪 70 年代出现红外变可见光上转换材料，从理论上提出反 Stokes 效应；1973 年发现稀土三基色荧光粉 ($\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}^{2+}$, $\text{MgAl}_{11}\text{O}_{19}:\text{Ce}^{3+}$, Tb^{3+} 和 $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$)，其光效和光色同时能达到较高水平，使电光源品质提高到一个新层次；1974 年在 Pr^{3+} 的化合物中发现光子剪裁，即吸收一个高能的光子，分割成两个或多个能量较小的光子；20 世纪 90 年代出现稀土长余辉荧光粉 ($\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$, $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$, RE^{3+} ($\text{RE} = \text{Dy}, \text{Nd}$ 等))；21 世纪初大力开发白光 LED(发光二极管)用荧光粉。

目前，稀土发光材料已成为发光材料研究和应用的重点和前沿领

域之一。稀土发光材料也是实现稀土资源高值化最重要的途径之一。我国具有丰富的稀土资源，为稀土发光产业的发展奠定了物质基础。自20世纪50年代末我国稀土分离技术的突破，高纯单一稀土被制备出来，为发展稀土发光材料提供了物质条件。近三十年来我国稀土发光材料获得了令人瞩目的发展，已在众多领域获得重要而广泛的应用，并且稀土发光材料产业已在国际上占有重要的地位。

稀土发光材料在文献和书籍中已有许多报道，也有一些专著，但近年来，在稀土发光材料领域又出现了一些新的进展，特别是白光LED在照明和显示中的应用，使稀土发光材料的研究和产业产生了颠覆性的变化，如CRT、PDP、FED等显示器退出历史舞台，灯用稀土三基色荧光粉产销量呈现急剧下降趋势。因此，有必要对以往的资料进行修改与补充，我们组织编写本书以供大家参考。由于有些内容在过去的专著中已有详细介绍，故本书仅针对一些重要的稀土发光材料，并结合发展前沿进行较深入的介绍。本书由具有丰富实践经验的专家、学者编写，希望本书能给人们一些有益的参考。

本书共分9章，第1章“稀土离子的光谱特性”由中国科学院长春应用化学研究所尤洪鹏编写；第2章“灯用稀土发光材料”由江门市科恒实业股份有限公司刘宗森、万国江统筹编写，陈伟、丁雪梅、龚敏、董瑞甜、胡学芳、王屏选、徐燕、钟华等共同编写；第3章“白光LED用稀土发光材料”由北京有色金属研究总院刘荣辉、温晓帆、刘元红、庄卫东编写；第4章“高压汞灯和金属卤化物灯用稀土发光材料”由北京有色金属研究总院余金秋、彭鹏编写；第5章“稀土长余辉发光材料”由中山大学王静编写；第6章“真空紫外光激发的稀土发光材料”由中山大学梁宏斌编写；第7章“稀土闪烁体”由北京有色金属研究总院余金秋、刁成鹏编写；第8章“稀土配合物发光材料”由中国科学院长春应用化学研究所洪广言编写；第9章“稀土纳米发光材料”由中国科学院长春应用化学研究所洪广言、张吉林编写。

由于本书涉及面广，参加编写的同志又较多，各位作者撰写风格不同，且所涉及的内容进展日新月异，书中不足之处，希望读者批评与指正。

本书是在中国稀土学会组织和资助下出版的，整个编写和出版过程都得到了中国稀土学会给予的大力支持，在此谨致衷心的感谢。同时感谢国家出版基金对本书出版的资助。

作 者
2016年2月

目 录

1 稀土离子的光谱特性	1
1.1 稀土离子发光的发现与研究过程	1
1.2 稀土离子的电子组态	2
1.3 稀土离子的光谱项与能级	3
1.4 稀土离子的能级跃迁与光谱特性	7
1.4.1 稀土离子的 $f-f$ 跃迁发光特征	8
1.4.2 稀土离子的光谱强度	8
1.4.3 谱线位移	10
1.4.4 超敏跃迁	11
1.4.5 光谱结构与对称性	12
1.4.6 稀土离子的 $f-d$ 跃迁的发光特征	16
1.4.7 稀土离子的电荷迁移带与光学电负性	22
1.5 稀土离子的能量传递	25
1.5.1 能量传递的方式	25
1.5.2 能量传递理论	27
1.5.3 不同稀土离子的能量传递	31
参考文献	35
2 灯用稀土发光材料	39
2.1 概述	39
2.2 三基色原理及应用	40
2.2.1 三基色基本原理	40
2.2.2 三基色荧光粉	40
2.2.3 三基色荧光粉的评价	41
2.2.4 三基色荧光粉混合粉	42
2.2.5 灯用荧光粉的应用	45

2.3 灯用稀土红色发光材料	49
2.3.1 概述	49
2.3.2 制备方法	51
2.3.3 影响红粉性能的因素	52
2.4 灯用稀土绿色发光材料	55
2.4.1 概述	55
2.4.2 铝酸盐绿粉	55
2.4.3 磷酸盐绿粉	61
2.5 灯用稀土蓝色发光材料	64
2.5.1 概述	64
2.5.2 铝酸盐蓝粉	64
2.5.3 磷酸盐蓝粉	68
2.6 灯用稀土特种发光材料	69
2.6.1 紫外灯用发光材料	70
2.6.2 高显色灯用荧光粉	73
2.6.3 植物生长灯用荧光粉	80
2.7 小结	82
参考文献	83

3 白光 LED 用稀土发光材料

3.1 概述	84
3.1.1 白光 LED 简介	84
3.1.2 白光 LED 的基本原理和结构	86
3.1.3 白光 LED 的封装	87
3.2 白光 LED 用铝酸盐荧光粉	89
3.2.1 白光 LED 用 YAG: Ce ³⁺ 荧光粉	89
3.2.2 白光 LED 用氟铝酸盐荧光粉	93
3.3 白光 LED 用硅酸盐荧光粉	95
3.3.1 白光 LED 用正硅酸盐荧光粉	95
3.3.2 白光 LED 用偏硅酸盐荧光粉	97
3.3.3 白光 LED 用其他硅酸盐荧光粉	99
3.4 白光 LED 用硅基氮化物荧光粉	103
3.4.1 M ₂ Si ₅ N ₈ : Eu ²⁺ (M = Ca, Sr, Ba) 荧光粉	103

3.4.2	$\text{MAlSiN}_3:\text{Eu}^{2+}$ ($\text{M} = \text{Ca}, \text{Sr}$) 荧光粉	106
3.4.3	$\text{SrAlSi}_4\text{N}_7:\text{Eu}^{2+}$ 荧光粉	108
3.4.4	$\text{MSiN}_2:\text{Eu}^{2+}$ ($\text{M} = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$) 荧光粉	109
3.4.5	$\text{CaAlSiN}_3:\text{Ce}^{3+}$	110
3.5	白光 LED 用硅基氮氧化物荧光粉	110
3.5.1	SiAlON 荧光粉	110
3.5.2	$\text{MSi}_2\text{O}_2\text{N}_2:\text{Eu}^{2+}$ ($\text{M} = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$)	112
3.5.3	$\text{M}_3\text{Si}_6\text{O}_{12}\text{N}_2:\text{Eu}^{2+}$ ($\text{M} = \text{Sr}, \text{Ba}$)	114
3.6	其他白光 LED 用荧光粉	117
3.6.1	白光 LED 用硫化物荧光粉	117
3.6.2	白光 LED 用钼酸盐荧光粉	118
3.6.3	白光 LED 用磷酸盐荧光粉	118
3.6.4	量子点发光材料	119
3.7	白光 LED 荧光粉的探索	121
	参考文献	122

4 高压汞灯和金属卤化物灯用稀土发光材料 133

4.1	高压汞灯及其稀土发光材料	133
4.1.1	高压汞蒸气放电与高压汞灯	133
4.1.2	高压汞灯用发光材料	135
4.2	金属卤化物灯及其稀土发光材料	140
4.2.1	金属卤化物灯	140
4.2.2	金属卤化物灯用稀土发光材料	147
	参考文献	153

5 稀土长余辉发光材料 155

5.1	概述	155
5.2	传统稀土硫化物长余辉发光材料	156
5.2.1	碱土硫化物长余辉发光材料	156
5.2.2	稀土硫化物长余辉发光材料的应用特性及其存在的不足	161
5.3	稀土铝酸盐长余辉发光材料	161
5.3.1	鳞石英结构稀土长余辉体系 MAl_2O_4 ($\text{M} = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}, \text{Mg}$)	162

5.3.2	SrO - Al ₂ O ₃ 体系和其他铝酸盐长余辉材料	168
5.3.3	稀土铝酸盐体系的应用特性及其存在的不足	169
5.4	稀土硅酸盐长余辉发光材料	169
5.5	稀土长余辉发光材料的新体系、新现象与新应用	172
5.5.1	稀土红色长余辉发光材料	172
5.5.2	基于稀土长余辉发光材料的交流白光 LED	184
5.5.3	稀土长余辉发光材料与生物荧光成像	185
	参考文献	188
6	真空紫外光激发的稀土发光材料	194
6.1	带间电子跃迁	194
6.1.1	导带底和价带顶的结构	194
6.1.2	带隙的大小	195
6.2	稀土离子的 <i>f-d</i> 跃迁	196
6.3	稀土离子在 VUV 光激发下的量子剪裁	200
6.3.1	单个稀土离子的量子剪裁	200
6.3.2	多个稀土离子作用下的量子剪裁	202
6.4	稀土离子的电荷迁移跃迁	205
6.5	VUV 激发下的荧光粉	206
	参考文献	208
7	稀土闪烁体	211
7.1	无机闪烁体	211
7.2	高能物理用闪烁体	213
7.3	核医学成像用闪烁体	215
7.4	稀土闪烁晶体	217
7.4.1	稀土硅酸盐闪烁体	218
7.4.2	稀土铝酸盐闪烁体	221
7.4.3	稀土卤化物闪烁体	223
7.5	闪烁陶瓷	228
7.5.1	闪烁陶瓷概述	228
7.5.2	稀土陶瓷闪烁体	229
	参考文献	232

8 稀土配合物发光材料	239
8.1 稀土配合物	239
8.1.1 稀土配合物的特点	239
8.1.2 稀土配位化学	240
8.2 稀土配合物发光	248
8.2.1 稀土离子发光	248
8.2.2 配体的光谱特性	249
8.2.3 配体到稀土离子的能量传递	250
8.2.4 影响稀土配合物发光的其他因素	252
8.3 稀土配合物光致发光材料及其应用	255
8.3.1 光转换材料方面的应用	255
8.3.2 配合物的结构探针	257
8.3.3 稀土配合物在生命科学中的应用	259
8.3.4 其他应用	262
8.4 稀土配合物有机电致发光材料及其应用	262
8.4.1 有机电致发光的基本原理和器件结构	262
8.4.2 稀土配合物 OLED 材料及其器件	267
8.5 稀土配合物复合材料	277
8.5.1 混合型稀土配合物复合发光材料	278
8.5.2 键合型稀土配合物复合发光材料	279
8.5.3 掺杂型稀土发光配合物	282
8.5.4 稀土发光配合物的包覆与组装	282
参考文献	283
9 稀土纳米发光材料	289
9.1 纳米化对稀土发光材料的影响	289
9.1.1 谱线位移	290
9.1.2 谱线宽化和新发光峰	293
9.1.3 荧光寿命改变	294
9.1.4 猝灭浓度增大	296
9.1.5 发光强度变化	297
9.1.6 一维、二维的稀土纳米发光材料	298

9.2 稀土纳米发光材料的制备	300
9.2.1 溶胶-凝胶法	300
9.2.2 沉淀法	301
9.2.3 燃烧法	301
9.2.4 微乳液法	301
9.2.5 水热法	301
9.2.6 静电纺丝技术	302
9.2.7 不同合成方法对光谱性能的影响	302
9.2.8 稀土纳米发光材料的组装与复合	303
9.3 稀土纳米发光材料的应用研究	305
9.3.1 稀土纳米发光材料的多功能化	305
9.3.2 稀土上转换纳米发光的研究与应用探索	306
参考文献	313

索引	321
----------	-----