



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 李春龙

稀土晶体材料

Rare Earth Crystal Materials

任国浩 孙敦陆 潘世烈 杭寅 武安华 编著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

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

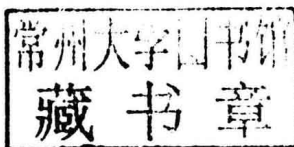
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

中国稀土科学与技术丛书

主 编 干 勇
执行主编 李春龙

稀土晶体材料

任国浩 孙敦陆 潘世烈 杭寅 武安华 编著



北 京

冶金工业出版社

2018

内 容 提 要

本书全面系统地介绍了以稀土元素为基质或以稀土元素为掺杂剂的光功能晶体材料的晶体结构和晶体缺陷,晶体生长中存在的主要科学和技术问题,稀土晶体的掺杂效应、温度效应以及抗辐照损伤能力,晶体的主要应用领域以及未来发展趋势。内容涵盖激光晶体、氧化物闪烁晶体、卤化物闪烁晶体、非线性光学晶体、磁光晶体等与稀土元素有关的晶体材料。全书侧重于材料的基本物理性能及其与稀土离子的相互关系,论述力求简洁、通俗和实用,尽量避免复杂的公式推导和物理理论的阐述。

本书可供从事稀土材料开发、制备和应用的科研、教学与生产技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

稀土晶体材料/任国浩等编著. —北京:冶金工业出版社, 2018. 5

(中国稀土科学与技术丛书)

ISBN 978-7-5024-7764-6

I. ①稀… II. ①任… III. ①稀土金属—金属晶体—材料科学 IV. ①TG146. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 096284 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 李培禄 肖 放 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7764-6

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2018 年 5 月第 1 版, 2018 年 5 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 17.5 印张; 341 千字; 265 页

85.00 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 干 勇

执行主编 李春龙

副 主 编 严纯华 张洪杰 李 卫 黄小卫

张安文 杨占峰

编 委 (按姓氏笔画排序)

干 勇 牛京考 古宏伟 卢先利 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 沈保根 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 洪广言 都有为 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的应用范围之广。

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

稀土元素是指元素周期表中的镧系元素以及与其同属第三副族的钪 (Sc) 和钇 (Y) 等共 17 个元素。稀土元素具有外层电子结构相同、内层 4f 电子能级相似的电子层结构, 因而包含了数目众多的能级, 能级之间可以发生光吸收和光发射的跃迁数目众多, 其能量传递的形式也数目众多, 它们可以被高能射线、真空紫外、紫外线、可见光和红外光等很宽范围的射线所激发而发光, 覆盖很宽的电磁波频谱。独特的电子结构赋予稀土化合物具有优异的光、电、磁、热等物理性能, 由此形成了品种繁多、性能各异的新型功能材料。

稀土晶体材料是指以稀土元素为基质或以稀土元素为掺杂离子的人工晶体。根据材料的功能, 稀土晶体可以划分为稀土激光晶体、稀土闪烁晶体、稀土非线性光学晶体和稀土磁光晶体, 以及其他功能的晶体材料等。这是一类以单晶材料为基础发展起来的新型材料, 材料的研发既涉及化学、结晶学、光学、光谱学、晶体物理等基础理论, 又与材料的制备工艺、加工技术和实际应用等密切相关。随着研究工作的深入, 一个又一个新晶体和新效应不断被发现, 晶体的质量和尺寸记录不断被刷新。稀土晶体的应用已经扩展到信息、能源、医疗等事关国计民生和国家安全的多个领域, 成为备受关注的核心材料。

随着对稀土晶体材料的深入开发和应用, 大量研究成果不断涌现, 为了及时搜集和整理已经取得的成果, 促进稀土资源的高效利用, 在中国稀土学会的组织下, 本书作者基于自己多年来的工作积累和国内外同行的研究成果, 对上述几类稀土晶体材料的发展历程、最新研究成果、材料制备中所涉及的工艺技术问题 and 应用前景等方面进行了系统的归纳和总结。其中第 1 章由中国科学院安徽光机所孙敦陆研究员

和上海光机所杭寅研究员编写,第2章和第3章由中国科学院上海硅酸盐研究所任国浩研究员编写,第4章由中国科学院新疆理化所潘世烈研究员编写,第5章由中国科学院上海硅酸盐研究所武安华研究员编写。

本书论述力求简洁、通俗和实用,适合从事稀土晶体材料开发、制备和应用的科研、教学与生产技术人员参考。

在此感谢中国稀土学会和冶金工业出版社为本书的筹划和出版所给予的积极支持和大力帮助!

由于时间仓促和水平所限,书中可能会有疏漏或错误,期盼读者不吝批评、指正。

作 者

2018年5月

目 录

1 稀土激光晶体材料	1
1.1 石榴石系列晶体	1
1.1.1 化学成分及晶体结构	1
1.1.2 基本物理性质	2
1.1.3 晶体生长	4
1.1.4 晶体缺陷	15
1.1.5 晶体性能及应用	21
1.2 稀土钒酸盐系列晶体	53
1.2.1 化学成分及晶体结构	53
1.2.2 基本物理性质	54
1.2.3 晶体生长	55
1.2.4 晶体缺陷	58
1.2.5 晶体性能及应用	59
1.3 钙钛矿系列晶体	62
1.3.1 化学成分及晶体结构	62
1.3.2 基本物理性质	63
1.3.3 晶体生长	64
1.3.4 晶体缺陷	64
1.3.5 晶体性能及应用	74
1.4 稀土钨酸盐系列晶体	80
1.4.1 化学成分及晶体结构	81
1.4.2 基本物理性质	82
1.4.3 晶体生长	82
1.4.4 晶体缺陷	84
1.4.5 晶体性能及应用	86
1.5 倍半氧化物系列晶体	88
1.5.1 化学成分及晶体结构	88
1.5.2 基本物理性质	89

1.5.3 晶体生长	90
1.5.4 晶体缺陷	91
1.5.5 晶体性能及应用	92
1.6 稀土氟化物系列激光晶体	93
1.6.1 化学成分及晶体结构	94
1.6.2 基本物理性质	95
1.6.3 晶体生长	96
1.6.4 晶体缺陷	97
1.6.5 晶体性能及应用	98
参考文献	113

2 稀土氧化物闪烁晶体材料 133

2.1 稀土正硅酸盐系列闪烁晶体	133
2.1.1 硅酸钇	135
2.1.2 硅酸钆	137
2.1.3 硅酸镧和硅酸钪镧	141
2.1.4 晶体应用	153
2.2 稀土焦硅酸盐系列闪烁晶体	153
2.2.1 焦硅酸镧晶体	154
2.2.2 焦硅酸钆闪烁晶体	157
2.2.3 焦硅酸钇晶体	162
2.2.4 焦硅酸铈晶体	163
2.3 YAG-LuAG-GGAG 石榴石系列闪烁晶体	163
2.3.1 晶体结构	163
2.3.2 晶体生长	165
2.3.3 闪烁性能	168
2.4 YAP-LuAP-GAP 稀土钙钛矿系列闪烁晶体	168
2.4.1 晶体结构	169
2.4.2 相图与相稳定性	169
2.4.3 基本物理性质	170
2.4.4 晶体生长与晶体缺陷	171
2.4.5 晶体闪烁性能及掺杂效应	172
参考文献	176

3 稀土卤化物闪烁晶体材料	184
3.1 Ce^{3+} 激活的稀土三卤化物闪烁晶体	186
3.1.1 氟化铈晶体	187
3.1.2 溴化铈晶体	189
3.1.3 氯化镧晶体	191
3.1.4 溴化镧晶体	200
3.1.5 碘化镧晶体	202
3.2 Eu^{2+} 掺杂的碱土金属卤化物闪烁晶体	203
3.2.1 碘化锂 ($\text{LiI}:\text{Eu}$) 闪烁晶体	203
3.2.2 碘化锶 ($\text{SrI}_2:\text{Eu}$) 闪烁晶体	206
3.2.3 Eu^{2+} 掺杂的复杂卤化物闪烁晶体	209
3.3 钾冰晶石型闪烁晶体	211
3.3.1 晶体结构	211
3.3.2 发光性能	212
3.3.3 n/γ 分辨能力	217
3.4 展望	218
参考文献	219
4 稀土非线性光学晶体材料	224
4.1 LCB 晶体	225
4.2 YAB 晶体	228
4.3 YCOB 和 GdCOB 晶体	232
4.4 其他新型稀土非线性光学晶体	235
4.5 稀土非线性光学晶体的典型应用	237
4.5.1 倍频和三倍频激光输出	237
4.5.2 激光自倍频输出	239
参考文献	241
5 稀土磁光晶体材料	247
5.1 引言	247
5.2 稀土与磁光效应	248
5.3 光通信用磁光晶体 YIG	249
5.3.1 YIG 晶体结构	249
5.3.2 YIG 晶体生长	251

5.3.3 掺杂 YIG 晶体	252
5.4 显示存储用磁光晶体	254
5.4.1 TGG 晶体结构	254
5.4.2 TGG 晶体生长	255
5.4.3 其他 TGG 结构晶体	256
5.5 其他磁光晶体	258
5.6 磁光器件及其应用	259
5.6.1 磁光隔离器	259
5.6.2 磁光开关	259
5.6.3 磁光传感器	260
5.6.4 磁光光盘	260
参考文献	260

索引	263
----------	-----

1 稀土激光晶体材料

激光材料主要指激光工作物质，是激光器的核心部件。根据工作物质的状态不同，可有以下几种类型：气体、液体、固体、等离子体等。而固体激光工作物质由于具有优异的性能而成为激光材料发展的重点。

固体激光工作物质由基质材料和激活离子两部分组成。工作物质的各种物理化学性质主要由基质材料所决定，光谱性能主要由激活离子所决定。但是由于激活离子与基质材料之间存在相互作用，基质材料对工作物质的光谱性能，激活离子对工作物质的物理化学性质都有一定的影响，有时这种影响十分重要。作为激光器件的核心，激光工作物质的质量将直接影响到激光器件的性能。

以稀土离子为激活离子、敏化离子或基质中含稀土成分的激光晶体归为稀土激光晶体，激光晶体中大部分是稀土激光晶体。至 1981 年，336 种获得激光输出的晶体中，有 324 种是稀土激光晶体。至 1991 年，实际使用的 54 种激光晶体中，有 45 种是稀土激光晶体。1993 年，国际激光材料市场上作为商品出售的 14 种激光晶体中，有 11 种是稀土激光晶体。稀土激光晶体可以应用于所有激光运行方式：脉冲、调 Q 或连续，直接输出波长基本上从紫外覆盖到中红外（0.286~7.6 μm ）。

目前，在稀土元素中已实现激光输出的有 Nd、Yb、Er、Ho、Tm、Ce、Dy、Pr、Sm、Eu、Tb 共 11 个三价离子和 Sm、Dy、Tm 3 个二价离子。激光基质已从最初几种发展到常见的数十种，如石榴石、钒酸盐、钙钛矿、钨酸盐、倍半氧化物、氟化物等，是发展固体激光技术的支柱。下面将介绍这些常见稀土激光晶体材料的化学成分、晶体结构、基本物理性质、晶体生长、晶体缺陷、晶体性能及应用。

1.1 石榴石系列晶体

1.1.1 化学成分及晶体结构

石榴石结构晶体有着许多诱人的特性。通常，化学式为 $\text{A}_3\text{B}_2\text{C}_3\text{O}_{12}$ （ $\text{A}=\text{Y}$ 、 Gd 、 Lu 等， $\text{B}=\text{Al}$ 、 Fe 、 Ga 、 Sc 等， $\text{C}=\text{Al}$ 、 Fe 、 Ga 等）的石榴石晶体属立方晶系，点群为 O_h^{10} ，空间群为 Ia-3d ，其中金属离子 A、B 和 C 分别占据 24(c)、16(a)、24(d) 位置，O 离子占据 96(h) 位置^[1]。根据 C 原子种类的不同，可分为三类

主要的石榴石晶体：铝石榴石（如 YAG）、铁石榴石（如 YIG）和镓石榴石（如 YGG）。石榴石结构的晶体材料中许多是优良的固体激光基质，如目前常见的 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ （YAG）、 $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ （GGG）、 $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ （LuAG）、 $\text{Lu}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ （LuGG）、 $\text{Y}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ （YSGG）、 $\text{G}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ （GSGG）、 $\text{Y}_3\text{Sc}_2\text{Al}_3\text{O}_{12}$ （YSAG）等。其结构可以看作四面体、八面体和十二面体的连接网，示意图如图 1-1 所示。 24A^{3+} 、 16B^{3+} 和 24C^{3+} 分别占据十二面体、八面体和四面体氧配位的中心位置。石榴石中的阳离子可以用其他阳离子进行置换，能形成品种极多、性能各异的科学技术上非常重要的各种石榴石晶体材料。

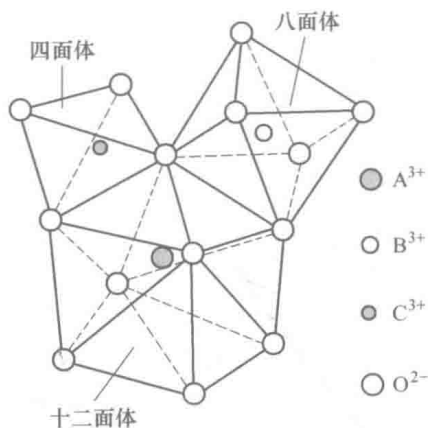


图 1-1 石榴石结构示意图

1.1.2 基本物理性质

激光工作物质的各种物理化学性质主要由基质材料所决定。基质晶体一方面是一个分散固定发光离子的“支架”，它使发光离子的相互作用不致太强，保证了激光发射所要求的线状谱特征；另一方面，它对激活离子光谱线的位移、分裂、加宽、能量转移以及辐射和无辐射过程起着重要作用。因此需要首先了解和掌握基质晶体的基本物理性能。

表 1-1 中列出了一些常见石榴石激光基质材料的基本物理性质。石榴石晶体有着优良的物理、化学和力学性能，高的热导率、硬度及光学质量，并且结构稳定，没有相变，很容易进行切割、抛光等加工。几种基质中，LuAG 的熔点最高，达到 2010°C ；YAG 熔点稍低，约为 1950°C ；GGG 熔点较低，比 YAG 低 230°C 左右；GSGG 和 YSGG 熔点介于 YAG 与 GGG 之间。几种基质晶体的莫氏硬度接近，在 7~8.5 之间。YAG 晶体有着最高的热导率 [$13\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]，LuAG 的热导率 [$9.6\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] 次之。高的热导率对于激光晶体非常重要，有利于激光振荡过程中的散热，减小热效应的影响，提高激光工作时的重复频率和输出能量。YSGG 晶体的声子能量最低，低的声子能量有利于减小无辐射跃迁几率，降低激光阈值和提高激光效率。GGG 晶体的密度最高，热容量大，适合作为热容激光基质晶体。表 1-2 中列出了几种常见石榴石基质的塞米尔方程及系数^[2~4]，可以计算出某种晶体在某个波长的折射率，在激光晶体元件镀膜时需要用到折射率值的大小。

表 1-1 一些常见石榴石激光基质材料的基本物理性质

基 质	YAG	GGG	GSGG	YSGG	LuAG
分子式	Y ₃ Al ₅ O ₁₂	Ga ₃ Ga ₅ O ₁₂	Gd ₃ Sc ₂ Ga ₃ O ₁₂	Y ₃ Sc ₂ Ga ₃ O ₁₂	Lu ₃ Al ₅ O ₁₂
分子量	593. 7	1012. 2	962. 8	757. 8	852
熔点/℃	1950	1750	1820	1877	2010
密度/g·cm ⁻³	4. 55	7. 09	6. 44	5. 20	6. 72
莫氏硬度	8. 25	7. 5	7. 1	约 7	8. 5
晶格常数/nm	1. 2007	1. 2373	1. 2554	1. 2426	1. 1916
线膨胀系数/K ⁻¹	8. 2×10 ⁻⁶	9. 03×10 ⁻⁶	7. 4×10 ⁻⁶	6. 55×10 ⁻⁶	8. 8×10 ⁻⁶
热导率/W·(m·K) ⁻¹	13	9	6	6	9. 6
折射率 (1064nm)	1. 82	1. 95	1. 94	1. 92	1. 82
声子能量/cm ⁻¹	860	738	741	727	777
折射率温度系数 (dn/dT)/℃ ⁻¹	7. 3×10 ⁻⁶	17×10 ⁻⁶	10. 5×10 ⁻⁶	7×10 ⁻⁶	8. 3×10 ⁻⁶

表 1-2 一些常见石榴石激光基质材料的塞米尔方程

基质	塞米尔方程 (λ: μm)	系 数		
YAG	$n^2 - 1 = \frac{A_1 \lambda^2}{\lambda^2 - B_1} + \frac{A_2 \lambda^2}{\lambda^2 - B_2} + \frac{A_3 \lambda^2}{\lambda^2 - B_3}$	A ₁	A ₂	A ₃
		1. 28040	1. 00244	4. 57401
		B ₁	B ₂	B ₃
		5. 49568×10 ⁻³	1. 92189×10 ⁻²	3. 87058×10 ²
GGG	$n^2 - 1 = \sum_{i=1}^3 A_i \lambda^2 / (\lambda^2 - L_i^2)$	A ₁	A ₂	A ₃
		1. 7727	0. 9767	4. 9668
		L ₁	L ₂	L ₃
		0. 1567	0. 01375	22. 715
GSGG	$n^2 = 1 + \frac{S \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2}$	S	λ ₀	
		2. 734	0. 1321	
YSGG	$n^2 = 1 + \frac{S \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2}$	S	λ ₀	
		2. 628	0. 127071	
LuAG	$n^2 - 1 = \frac{A_1 \lambda^2}{\lambda^2 - B_1} + \frac{A_2 \lambda^2}{\lambda^2 - B_2} + \frac{A_3 \lambda^2}{\lambda^2 - B_3}$	A ₁	A ₂	A ₃
		1. 47199	0. 845642	3. 82124
		B ₁	B ₂	B ₃
		6. 21359×10 ⁻³	2. 00432×10 ⁻²	3. 30483×10 ²