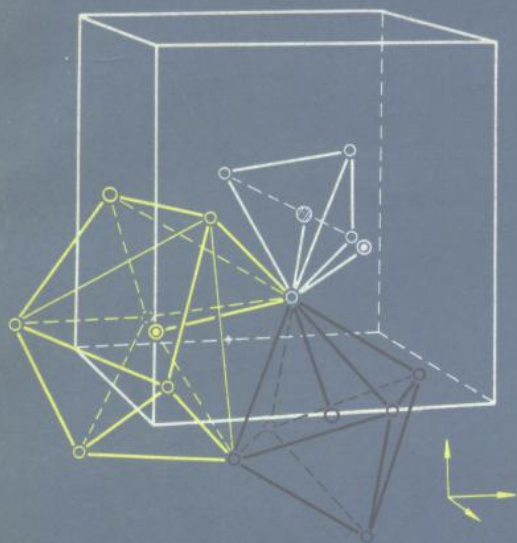




激光基质 钇铝石榴石的发展

陆学善编

科学出版社

内 容 简 介

激光晶体是晶体激光器的工作物质,用人工方法合成性能优良的激光晶体是研制晶体激光器的先决条件。

钕钒石榴石是一种人造晶体,在国内外资料中都简称 YAG。它作为激光基质晶体,已有七年多的历史了。近年来,随着激光方面高效能谐振器的发现,大大地提高了 YAG 的重要性。

本书综合了近几年国外公开发表的有关 YAG 单晶材料方面的资料,就钕钒石榴石激光器的性能及发展现状,钕钒石榴石的晶体化学、晶体生长、以及晶体生长过程中容易出现各种缺陷问题作了简略介绍。

本书可供从事激光晶体材料研制和有关方面的同志参考。

激光基质钕钒石榴石的发展

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1972 年 6 月第一版

1972 年 6 月第一次印刷

定价: 0.20 元

毛主席語录

自然科学是人们争取自由的一种武装。人们为着要在社会上得到自由，就要用社会科学来了解社会，改造社会进行社会革命。人们为着要在自然界里得到自由，就要用自然科学来了解自然，克服自然和改造自然，从自然里得到自由。

一切外国的东西，如同我们对于食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃肠运动，送进唾液胃液肠液，把它分解为精华和糟粕两部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收。

前 言

激光是近十年来才发展起来的一项新的尖端科学技术，到目前已制成晶体、玻璃、气体、半导体、液体等类型的激光器数百种。晶体激光器体积小，耗电少，性能稳定，因而在微型加工、彩色电视、光雷达、测距以及其他军事技术和科学实验中得到了越来越广泛的应用。激光晶体是晶体激光器的工作物质，用人工方法合成性能优良的激光晶体是研制晶体激光器的先决条件。

为适应我国激光技术的飞跃发展，使从事激光工作者对钇铝石榴石单晶材料的国外发展情况有所了解，遵照伟大领袖毛主席关于“**洋为中用**”的教导，综合了近几年国外公开发表的有关这方面的文章，本书就钇铝石榴石激光器的性能及发展现状，钇铝石榴石的晶体化学、晶体生长、晶体生长过程中容易出现各种缺陷，以及避免这些缺陷所采用的方法等问题作一简略的介绍。

本书可供从事激光晶体材料研制和有关方面的同志参考。由于个人的思想水平和业务水平很有限，书中会有不少缺点和错误，恳请同志们批评指正。

编 者

1972年5月

目 录

(一) 引论	1
(二) YAG 作为激光基质的特性	2
(三) YAG 的晶体化学	12
(1) YAG 的相平衡关系	12
(2) YAG 的晶体结构	20
(四) YAG 单晶体的生长	27
(1) 焰熔法	28
(2) 熔盐法	29
(3) 水热法	33
(4) 提拉法	34
(5) 浮区法	40
(五) 晶体缺陷	43
(1) 开裂	43
(2) 内核	46
(3) 色心	48
(4) 组分过冷与网络结构	48
(5) 液流	49
(6) 温度波动与生长条纹	50
(7) 杂质	51
(8) 温度	52
(9) 热应力双折射	52
(10) 位错	53
(六) 钎酸钇的发展	54
(1) 钙钛矿型结构	54

(2) YAlO_3 的结构	56
(3) 性质比较	57
(4) 生长	63
(七) 参考资料	65

(一) 引 论

钕铝石榴石是一种人造晶体,在国内外资料中都简称 YAG。它作为激光基质晶体,已有七年历史了。近年来激光方面高效能谐振器的发现,大大地提高了 YAG 的重要性。两种大家所熟知的 YAG 激光器是 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 和 $\text{Nd}^{3+} + \text{Cr}^{3+}:\text{YAG}$ 。 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 是 YAG 中掺钕离子 (Nd^{3+}) 的激光器,是 1964 年贝耳电话实验室 Geusic^[29] 等人所发展起来的; $\text{Nd}^{3+} + \text{Cr}^{3+}:\text{YAG}$ 是同年 RCA 实验室 Kiss^[30] 等人所发展起来的。由于可以有目的地掺入其它杂质而发出波长不同的强力激射,因而 YAG 作为激光基质的应用范围在不断地扩大。

YAG 作为激光基质虽则只有七年的历史,但是,国际上关于它的研究风起云涌,使这门新技术蓬勃发展起来。现发表的有关这方面的论文已有百余篇。本书即根据这百余篇论文加以综述,以供从事激光工作的同志参考。

YAG 激光器的性质,首先决定于 YAG 晶体的质量,这就是说,决定于晶体的完整性和掺入离子的均匀性。在发展激光器的过程中,这是一个关键问题。本书将就 YAG 激光器的性能及发展现状, YAG 的晶体化学, YAG 单晶体的生长,晶体生长过程中所容易出现的各种缺陷,以及避免这些缺陷的可采用的方法等问题加以讨论。有关器件方面的问题本书将从略。

同 YAG 相关的还有钼酸钕,由于同是氧化钕和氧化铝的化合物,而且很有发展前途,因此将一并讨论。

(二) YAG 作为激光基质的特性

激光器的特点在于发射一束强度很大、宽度很小、单色而相干的平行光线。其所以能够受激发射,在于掺入基质内的离子受泵浦后能级占有数倒转而产生能级跃迁。

Nd^{3+} :YAG 激光器的激射波长主要取决于 Nd^{3+} 离子的能级,而 Nd^{3+} 离子的能级受着基质晶体场的影响。

可作为 Nd^{3+} 离子的基质的不限于晶体,玻璃也可作为基质,如钕玻璃^[23]。人们自然会想到,既然玻璃也可作为基质,那末玻璃要比晶体容易制备,又何必一定要生长单晶体呢?

晶体基质优于玻璃基质之处在于:第一,晶体基质的热导率要比玻璃大得多,这样热量就容易发散;第二,晶体基质的熔点都比玻璃高,激光器泵浦后闪光的大部分能量转换为热量,基质的熔点高和热导率大就不容易使器件受到损害;第三,晶体激光器所发射的荧光其线宽要比从玻璃激光器所发射的窄得多;第四,晶体的硬度一般要比玻璃大。

YAG 是一种硬度很大的各向同性晶体,是 Nd^{3+} 离子的理想基质,它的热导率比玻璃大 10 倍。

应该指出,能作 Nd^{3+} 离子基质的晶体并不只限于 YAG 一种。在 1969 年以前所知道的就有近 20 种。有稀土金属的氧化物、氟化物、钒酸盐、磷酸盐、钨酸盐、钼酸盐以及铌酸盐等等。现将这些晶体的有关性质列于表 1^[119]。

表中 YLF 指氟化钪锂 (YLiF_4)。FAP 指氟磷酸钙 [$\text{Ca}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}$],这是另一种离子对称性比较低的基质,它的阈值低,增益大而效率高。FAP 的 Nd^{3+} 离子荧光谱主要特点是

表 1 晶体激光基质的性质

晶 体	晶 体 对称性	离子座 对称性	密 度 (g/cm ³)	硬 度 (莫氏*)	热导率 (mW/cm ² °C)	熔点 (°C)
YAG	Ia3d	见下文	4.55	8.5	140	1970
Y ₂ O ₃	Ia3	2, $\bar{3}$	5.06	6.8	134	2450
Gd ₂ O ₃	C2/m					2330
YVO ₄	I4 ₁ /amd	$\leq \bar{4}2m$	4.22	4.6—5	51	1635—1730
LaF ₃	P $\bar{3}$ Cl	2	5.94	4.5		1493
CeF ₃		2, mm2 或 6m2	6.16	4.5		1324—1425
CaF ₂	Fm3m		3.179	4.0	97	1360
SrF ₂	Fm3m		4.275	4.0		1400
NaCaYF ₆	立方					
FAP	P6 ₃ /m	m	3.20	5.0—5.5	24(a), 20(c)	1705
YLF	I4 ₁ /a					
NaLa(MoO ₄) ₂	I4 ₁ /a	$\bar{4}$ (平均)	4.79	4.5	22	1300—1350
NaGd(WO ₄) ₂	I4 ₁ /a	$\bar{4}$ (平均)				1400
CaWO ₄	I4 ₁ /a	$\bar{4}$	6.062	4.5	40	1570—1595
CaMoO ₄	I4 ₁ /a	$\bar{4}$	4.38	4.3	38.6—39.5(a) 38.2—39.8(c)	1430—1480
SrMoO ₄	I4 ₁ /a	$\bar{4}$			40.4(a) 41.6(c)	1490
PbMoO ₄	I4 ₁ /a	$\bar{4}$ 或 $\bar{4}2m$				1070
Ca(NbO ₃) ₂	Pbcn		4.80	5.5		1560
LiNbO ₃	R3C		4.7	5		1260

* 莫氏硬度是一种刻痕硬度,以矿石做标准,从滑石到金刚石分为十度。

只有一条单一的窄而强的线,而吸收光谱却是比较宽广的。从这一点看,虽则这种材料现在所能达到的光学性能要比 YAG 还差得多,但它也是一种比较理想的晶体。

Nd³⁺:YAG 是一种四能级晶体激光器,可以在 300°K 下操作。激光跃迁的终态离基态约为 2,000cm⁻¹。由于终态并没有被占有,所以很容易达到阈值条件。激光跃迁是从 ⁴F_{3/2} 态晶体场的最低能级跃迁到 ⁴I_{11/2} 态晶体场的一个能级的。这

一跃迁的波长为 1.0648μ 。Nd³⁺:YAG 曾以连续波(CW)的形式工作到 360°K。

Nd³⁺:YAG 的重要光谱数据如图 1 所示。图 1a 表示 YAG 在激光输出区附近 Nd³⁺ 的荧光谱;图 1b 是相应的能级图。在室温下,最强线 1.0648μ 的宽度为 6.5cm^{-1} ;在 77°K 时,线宽为 $1.0\text{—}1.5\text{cm}^{-1}$ 。

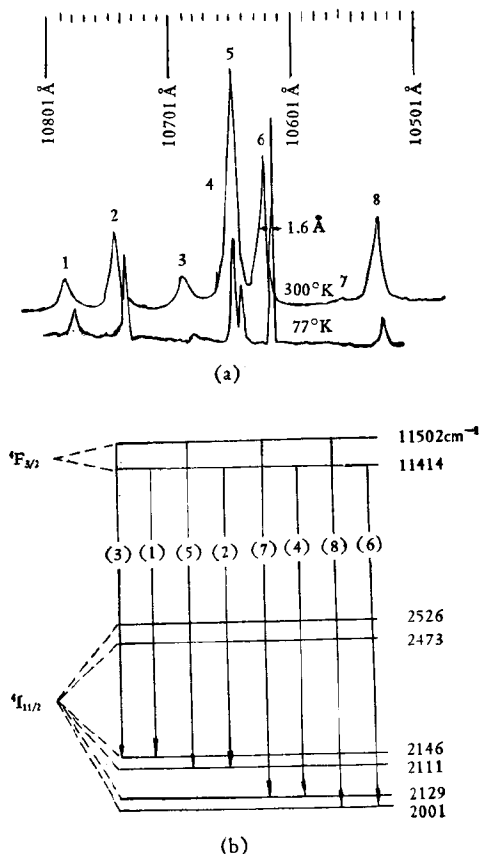


图 1

$\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 的激光作用还不止于 1.0648μ 这一波长。以后还在 $1.0519-1.1226\mu$ 的范围内找到其它六条 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ 跃迁线^[97]; 除此之外, 还在 1.319μ 找到一条单一的 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$ 跃迁线。兹将所量得的波长、阈值及输出功率列表如下:

表 2 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 的激光波长

测 得 波 长 (μ)	阈 值 (W)	输 出 功 率 (mW) (一端)	跃 迁
1.0519 ₁	594	1.4	${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$
1.0613 ₆	300	7.0	${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$
1.0640 ₁	286	11.9	${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$
1.0736 ₆	348	6.3	${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$
1.1119 ₄	623	4.2	${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$
1.1158 ₀	646	1.4	${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$
1.1225 ₈	676	2.1	${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$
1.319	457	30	${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$

除此之外, 最近还找到另外两条激光线。一条波长为 0.946μ , 相当于 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$ 的跃迁^[121]; 另一条波长为 1.883μ , 相当于 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 的跃迁^[225]。

表 3 综合了 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 一些重要性质, 所列激光常数是 在 1.064μ 这一波长下测得的^[132]。

对未加掺质的纯 YAG 而论, 它的一些物理和化学性质见表 4。

上面所说的 YAG 激光器是按单纯掺入 Nd^{3+} 离子而言的, Nd^{3+} 离子的掺入浓度大约在 1.0—1.2 原子百分比之间。如上所述, 我们也可在 YAG 中掺入其它稀土族三价离子, 掺入量的限度决定于离子半径及熔液和固体间的杂质分布系数。例如, 头几个稀土族元素只能加进 0.5—2.0 原子百分比去, 而最后的稀土族元素却可以完全替代进去。

有时也可靠双掺入的办法来提高激光器的性能, 这就是

表 3 Nd³⁺: YAG 在 25℃ 的性质

性 质	数 值	性 质	数 值
公式	Y _{2.97} Nd _{0.03} Al ₃ O ₁₂	有 Q 开关脉冲宽度	175×10 ⁻¹ 秒
重量% Nd	0.725	热导率	0.14Wcm ⁻¹ °K ⁻¹
Nd 原子/cm ³	1.38×10 ²⁰	在阈值的振荡模式	TEM ₀₀ , TEM ₀₁
波长	10,641 Å	纵模式	5 个模式, 相隔 0.078cm ⁻¹
δν/δT	0.064cm ⁻¹ °C ⁻¹	输出偏振度	非偏振
线宽	6.5cm ⁻¹ , 1.2—3.0 Å	泵浦脉冲宽度	200×10 ⁻⁹ 秒
跃迁	⁴ F _{3/2} → ⁴ I _{11/2}	热膨胀	6.9×10 ⁻⁶ °C ⁻¹
荧光衰减时间	200 微秒	折射率(n)	1.823
脉冲阈值	2.0—3.8j	dn/dT	7.3×10 ⁻⁶ °C ⁻¹
振荡阈值(半连续)	400—550W	比热	88.8Cal mole ⁻¹ °K ⁻¹
CW 阈值	730—1300W	热扩散率	0.050cm ² 秒 ⁻¹
激光跃迁截面	2.7—3.5×10 ⁻¹⁹ cm ²	介电常数	ε _j = 11.7, ε _∞ = 3.65
模式锁定脉冲宽度	4—7×10 ⁻¹¹ 秒		

表 4 纯 YAG 的性质

性 质	数 值
公 式	Y ₃ Al ₅ O ₁₂
分 子 量	593.7
晶体结构	立方晶系, 空间群 Ia3d, a ₀ = 12.005 Å
莫氏硬度	8—8.5
熔 点	1950°C
密 度	4.55g/cm ³
色 泽	无色
化学性质	不溶于 H ₂ SO ₄ , HCl, HNO ₃ , HF; 溶于 H ₃ PO ₄ , >250°C; PbO-PbF ₂ , 共晶温度 >550°C

说, 除 Nd³⁺ 外, 同时可掺入另一种离子进去。上面已经讲到 Nd³⁺ + Cr³⁺ 的双掺问题, 加入 Cr³⁺ 的结果, 效率至少增加两倍, 同时阈值也下降了。光泵固体激光器的效率往往受吸收

条件的限制,这就是说,激光物质往往缺少适当的吸收带来配合闪光灯的输出光谱。三价稀土激光器只有一个比较微弱的 $4f - 4f$ 宇称禁戒吸收,因此只能靠增加掺质浓度的办法来解决这个困难。如果另一掺质加进去有它自己的适当吸收带,并且从这抽运离子的激光能量可有效地迁移到稀土离子上去,那末这里就产生交叉抽运,效率就大大地提高了。在 $\text{Nd}^{3+} + \text{Cr}^{3+}:\text{YAG}$ 的情形, Cr^{3+} 离子 $3d$ 带的能量可迁移到 Nd^{3+} 离子的 $4f$ 态上去。在另一方面,加入离子半径较小的掺质可同时增加所能掺入 Nd^{3+} 离子的绝对量,例如, $\text{Nd} + \text{Gd}$ 或 $\text{Nd} + \text{Lu}$ 的双掺,就把 YAG 中所能掺入 Nd^{3+} 的绝对量提高了。

泵浦 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器一般用碘钨灯,也可用水银灯、氙光灯(Xe 光灯)或氪光灯(Kr 光灯)。

实验证明, K-Hg 放电管的泵浦效率要比碘钨灯大 3—4 倍^[94]。关于 Xe 光灯和 Kr 光灯的泵浦效率,则自 1966 年以来曾做过一系列的研究。有人认为,对在室温工作而连续泵浦的 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 而论, Kr 光灯要比 Xe 光灯或碘钨灯效率大两倍^[51],而另一研究则谓,虽则用 Kr 光灯泵浦 YAG 在 0.810μ 处的输出要高得多,但一般而论, Xe 光灯的效率比 Kr 光灯高^[86]。最近又有人比较了 Xe, Kr 和 I 这三种光源的效率,证明 Kr 光灯效率最高^[136,137,153]。

用两个 Kr 光灯在一双椭圆泵浦腔中抽运,测量其所吸收的辐射以及所耗散的热量^[141]。结果表明,在高功率 YAG 系统中,如输入功率为 12KW,则输出功率为 250W,只有 7.5% 的电能被晶体所吸收,其中 40% 的功率成为受激发射。在 Kr 光灯的电输入功率中,只有 15% 进入 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 的吸收带中去。

除用闪光灯泵浦外, Nd:YAG 还可用太阳能泵浦。已成

功地制得输出为 1W 的太阳能连续 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器^[55]。并曾配用 GaAs 电光调制器发送电视图象。这在空间通信方面有很大的潜在力^[52]。

此外, 半导体注入式激光器也可作为 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 的泵浦光源。例如, GaAs 激光器曾被用作光源, 所需要的光能要比用闪光灯小 5%^[95]。GaAs_xP_{1-x} 也曾被用作泵浦光源, 在 77°K 下得到 48mW 的 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光连续输出, 输入总能量为 4.8W, 达到的功率效率为 1%, 这是可以和其它最好的泵浦光源相媲美的^[102]。

自从 1964 年发现 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器以来, YAG 激光器的性能在不断地提高。以用重复 Q 开关连续抽运的脉冲输出而论, 1965 年曾得到 250W 的峰值输出功率, 输入功率为 1KW^[36]。1967 年曾得到峰值输出功率为 1KW, 脉冲宽度为 175 毫微秒, 重复率为每秒 500 脉冲。在 1.064μ 处的输出包括 5 个纵向模式, 而 60% 的功率都在最低级的 TEM_{00} 横向模式^[76]。

表 5 代表 1968 年在有 Q 开关及无 Q 开关情况下所得到

表 5 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 的输出

波 长 (μ)	阈 值 (WS)	荧光寿命 (μS)	无 Q 开关平 均输出 (mW)	有 Q 开关峰 值输出 (KW)
1.052	2.7	325	50	2
1.061				
1.064	0.35	200	440	240
1.073	1.3	240	85	50
1.318	1.2	290	110	80
1.330				
1.335				
1.338	1.5	290	90	28
1.353				
1.358	1.9	360	60	5

的 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 受激发射情况^[87]。调节棱镜及反射镜的取向,受激发射可在 1.06μ 的 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ 和 1.32μ 的 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$ 这两个跃迁中任意选择。

就连续输出功率而论,则1969年已成功地制备了高功率 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 连续激光器,输出功率为 105W ^[114]。同年,又在 1.06μ 处获得了 250W 的输出,其总效率为 2.1% ,所用晶体直径 6mm ,长 76mm ^[112]。而1970年4月国外某公司曾宣称第一次获得了 $1,100\text{W}$ 的连续输出,这是到现在为止最大的连续输出功率,但后来没有看到详细报导。

如所周知, $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器是一种高效率的红外辐射源。用非线性晶体倍频可产生高强度的单色可见光。

1965年,曾用单畴铌酸锂 LiNbO_3 晶体有效地获得了 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 的连续第二谐波发生器^[38]。从 1.06μ 这一波长倍频,可以得到 500mW 的在 0.532μ 处的连续输出,如果用高重复率 Q 开关,则输出功率可超过 1KW 。利用铌酸钡钠($\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$)作非线性晶体,能产生 1.1W 的相干绿光,这是一种连续的固态光源,代表 100% 从红外到绿光的转换^[90,148]。

碘酸锂 LiIO_3 也是一种良好的非线性晶体,它的非线性系数和铌酸锂相仿,但受光学损害的可能性要小得多,也可作为 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 的有效倍频器^[145]。

调节棱镜及反射镜的取向,可使从 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 所发出来的激光在波长 1.32μ 处的峰值功率达到 $28-80\text{KW}$ 。用一个有选择性的周期多重共振反射器也可在 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光器的发射中抑制 1.064μ 而得到 1.318μ 的激光^[143]。在此条件下用磷酸双氢钾(KH_2PO_4)[KDP]和碘酸(HIO_3)倍频曾得到 0.659μ 和 0.669μ 的第二谐波,这是红光。

利用KDP作为非线性晶体,可把 0.946μ 这一激射波长倍频而得到 0.473μ 的蓝光,有 Q 开关的峰值功率达到 2KW ^[121]。

利用非线性晶体, 我们还可从 Nd:YAG 得到可调光学参量振荡器。曾利用 $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ 而在 1.064μ 的第二谐波 0.532μ 处泵浦, 所得到的阈值为 45mW , 参量转换效率约为 1% , 泵浦功率为 300mW 。用这个参量振荡器, 可以在 $0.98—1.06\mu$ 的波长范围内观察到振荡^[96]。

我们也可把 Nd:YAG 的 0.946μ 这一发射作为铈酸锂的泵浦光源, 而得到可调光学参量振荡器, 可以在 $0.54—0.61\mu$ 的范围内调频^[121]。

用发射 1.064μ 的重复 Q 开关 Nd:YAG 激光器作泵浦光源, 非线性晶体淡红银矿 Ag_3AsS_3 也可作参量振荡器, 输出波

表 6 YAG 掺入其它稀土离子后的激光特性

激活离子	基 质	温度 (°K)	激光波长 (μ)	跃 迁	脉冲阈 值 (焦耳)	CW 阈值	
						Hg灯	W灯
Tm^{3+}	$\text{Er}_{1.45}\text{Y}_{1.5}\text{Al}_5\text{O}_{12}$	77	A. 1.880	$^3\text{H}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$	264		520
			B. 1.884		180		
			C. 2.014		170		
	YAG	77	B. 1.8834		590		315
			C. 2.0132		208		
	YAG + 0.5% Cr^{3+}	77	C. 2.0132		30	800	160
Ho^{3+}	$\text{Er}_{1.45}\text{Y}_{1.5} \cdot \text{Al}_5\text{O}_{12}$	77	A. 2.0979	$^5\text{I}_7 \rightarrow ^5\text{I}_8$	640	680	47
			B. 2.0917		390		
			C. ~ 2.123		3800		
	YAG	77	A. 2.0975		44		210
			B. 2.0914		1760		
			C. 2.1223		410		
Yb^{3+}	YAG	77	A. 2.0975	$^2\text{F}_{5/2} \rightarrow ^2\text{F}_{7/2}$	25	1300	250
			C. 2.1223		25		
Er^{3+}	YAG	77	A. 1.6602	$^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$	80		
			B. 1.6452		470		

长在 2.1μ 左右^[124]。

虽然掺 Nd^{3+} 的 YAG 受激后主要能发射波长为 0.946μ 、 1.064μ 、 1.319μ 、 1.883μ 的激光，但是，YAG 可掺入任何稀土离子，这就大大地增加了它作为基质的作用。

铥、钬、镱和铒的四种稀土离子 (Tm^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Yb^{3+} 、 Er^{3+}) 掺入 YAG 后的激光特性见表 6^[37]：

YAG 掺 Ho^{3+} 后，如同时掺入 Er^{3+} 、 Yb^{3+} 或 Tm^{3+} ，则这三种离子都把能量迁移到 Ho^{3+} 离子上去。这一事实曾被用来产生波长为 2.123μ 的激光，用钨丝灯做激励光源^[44]。输入功率为 300W，输出功率达到 15W。

由此可见，YAG 作为激光基质的效能在地不断地扩大，因此有必要对这一基质的生长及本质作进一步的了解。