

微型激光材料——四磷酸铽锂

华大物理系 张文珍 上海光机所 张顺兴

提 要

本文叙述了微型激光器对晶体材料的要求;综述了四磷酸铽锂微型激光器的特点,晶体生长,晶体结构和浓度猝灭,光谱性质和激光特性,提出了今后的发展方向。

前 言

最近发展起来的五磷酸铽^[1]和四磷酸铽锂^[2]等小型铽激光器在国内外已作了广泛的研究。这种微型固体激光器的发展填补了半导体激光器和小型Nd:YAG激光器在输出功率间的空白。它既有半导体激光器小型化的特点,也具备了固体激光器的某些优点。人们已考虑用微型高Nd浓度材料来实现光纤通讯的可能性;另外,它还可能用于激光扫描和卫星间的通讯,如果进一步深入研究,有可能扩大它的应用范围,例如用作中短距离和空间测距功率源以及作为其它方面应用的小能量源。

一、微型激光器对激光晶体的要求

对微型激光器而言,它除了一般激光器对晶体材料的要求外,还有其不同的要求。因为微型激光器要求工作物质尺寸很小,所以这些材料的光增益系数必须十分大才行,同时为了有效地泵浦,材料对泵浦光的有效吸收也要很大。这二个要求一般可以同时得到满足,因为增益系数大的材料,对泵浦光的吸收率也高。

增益系数与反转粒子数和发射截面成正比,所以上述的要求相当于掺杂浓度高和发射截面大二点。研究发射截面大的材料和提高掺杂浓度是寻找微型激光材料的途径。

半导体激光器和色心激光器是属于微型激光器,这主要是因为它们的发射截面非常大。五磷酸铽和四磷酸铽锂是铽浓度很高的材料,而它们的发射截面并不减少很多(弱浓度猝灭材料),所以是高增益材料,这种晶体也是微型激光器的优良材料。

除此以外,这种材料应当有高的量子效率,高的荧光分支比和低阈值,由于它一般应用于连续运转,还要求荧光线宽窄。

到目前为止,人们已经研究出有可能适用于微型激光器要求的晶体:磷酸盐^[1-5]、钨酸盐^[6]、硼酸盐、^[7]铽酸盐^[8]、铝酸盐^[9]、钼酸盐^[10]等系列。这些系列中,虽然都是高Nd浓度弱猝灭材料(也称小浓度效应),但荧光线宽都比Nd:YAG宽,对微型连续激光器来说,这样的性质还不够理想,今后需要进一步寻找一种荧光谱带更窄的小浓度效应材料。不过从现有的这些材料性质来看,四磷酸铽锂($\text{LiNdP}_4\text{O}_{12}$,简称LNP)还是基本上可满足微型激光器的需要。

二、LNP微型激光器的特点

四磷酸铈锂是最近几年发展起来的微型激光晶体, Nd 离子既是激活剂又是基质材料的组份之一, 它是一种高浓度弱猝灭激光晶体, Nd 浓度虽然高至 $4.37 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$, 但荧光寿命仍长达120微秒。荧光寿命可用下式表示:

$$\tau_f = \tau_0 / (1 + CN^2) \dots\dots\dots (1)$$

式中 τ_f 为高Nd浓度时的荧光寿命, τ_0 表示材料为低Nd浓度时的荧光寿命, C 为猝灭率, N 为Nd浓度。 $\frac{\tau_0}{\tau_f}$ 称为寿命比, 其值越大, 浓度猝灭越严重; 反之, 浓度猝灭则弱。C 值也有同样的规律。LNP 的寿命比 2.41^[11], $C = 0.5 \times 10^{-43} \text{cm}^6$ 。它具有阈值低, 光转换效率高, 可获得偏振的激光输出等特点^[12]。

LNP 激光器具有半导体激光器体积小, 重量轻的优点, 又克服了半导体激光器模特性差, 发散角大, 输出功率小等问题, 可以产生较高的激光亮度。LNP 激光器的发射波长为 1.047 微米, 如果用于光纤通讯中, 这个波长要比激光二极管发射的波长为 0.8-0.9 微米的激光在光纤中损耗小^[15]。

如果把 LNP 与小型 Nd:YAG 比较的话, 虽然小型 Nd:YAG 的单程损耗系数 (0.002cm^{-1}) 比 LNP 的单程损耗系数 (0.1cm^{-1}) 小得多^[13-14], 但是 LNP 的最大激光跃迁截面为 Nd:YAG 的 1.8 倍, 基态 Nd 总密度 $4.37 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$ 比掺杂 1% 的 Nd:YAG 高 33 倍^[2]。如果要得到同亮度的激光输出, LNP 晶体为 Nd:YAG 的十几分之一就可以了, 这样对单程损耗的要求就低得多。LNP 激光器还可以获得偏振激光输出, 而 Nd:YAG 却没有这个特点。

把 LNP 晶体参数与其它高Nd浓度材料比较时 (见表一), 我们可以发现, 它的荧光寿命较长, Nd 浓度, 激光发射截面比五磷酸铈 (NdP₅O₁₄, 简称NPP) 晶体还要大, 而阈值功率和“荧光寿命比”都比 NPP 稍小, 并且, NPP 激光器的激光输出不是偏振的, 这在使用上受到了一定的限制。

在 MeNdP₄O₁₂ (Me = Li, Na, K) 系列中^[15], LNP 的阈值功率最低, 荧光寿命最长, 从晶体的结构分析中很明显地看到, 随着碱离子 (Li → Na → K) 半径的增加, Nd 离子周围的局部对称性变得较低, 在 NaNdP₄O₁₂ 和 KNdP₄O₁₂ 晶体中较大的阈值功率可能¹是由 Nd³⁺ 和碱离子之间较大的相互作用结果。用晶体离子性的大小也能解释这种现象^[16], 晶体离子性的大小可以从下式算出:

$$I = \Delta X \frac{R_c}{R_a} \dots\dots\dots (2)$$

式中 ΔX 是阴阳离子电负性差值, $\frac{R_c}{R_a}$ 是阴阳离子的半径比。如果中心多面体的 I 值和邻近多面体的 I 值愈小, 电声子偶合强度也愈小, 荧光转换效率就愈高, 浓度猝灭就愈弱。Li 的离子半径比 Na, K 小, 电负性比它们大, 这样, 在 MeNdP₄O₁₂ 系列中 NdO₈ 多面体的 I 值是一样的, 而在 LNP 中, 多面体 LiO₄ 的 I 值比另外二种材料小, 所以 LNP 中电声

表一 LNP 晶体与其它高 Nd 浓度晶体参数的比较

晶 体 名 称	Nd ³⁺ 浓度 ($\times 10^{21}$ cm ⁻³)	有效发射 截 面 σ ($\times 10^{-19}$ cm ²)	荧 光 寿 命 τ (微秒)	阈 值 功 率 (毫瓦)	泵 浦 源	激 光 波 长 (μ)	参 考 资 料
NdP ₅ O ₁₄	3.96	约 2	120	脉冲4mj ; 95mj	0.58 μ m脉冲染料 激光; 脉冲Xe灯	1.051	[17—18]
				连续侧向 0.6mw	0.80 μ m的Kr或0.58 μ 连续染料激光器		[13]
LiNdP ₄ O ₁₂	4.37	3.2	120	0.14	0.514 μ Ar激光器	1.047	[19]
NaNdP ₄ O ₁₂	4.24	2.1	110	4.5	同 上	1.051	[20]
KNdP ₄ O ₁₂	4.08	1.5	100	0.45	0.58 μ m连续染料 激光	1.051	[21]
NdAl ₃ (BO ₃) ₄	5.43	约 8	20	0.55-1.9	同 上	1.065	[21]
K ₃ Nd (PO ₄) ₂	5.0	6~8 \times 10 ⁻²⁰	21	7.5	同 上	1.055	[22]
NdNa ₅ (WO ₄) ₄	2.6	5	85~120	0.33	同 上	1.063	[22]
K ₅ Nd (MoO ₄) ₄	2.37	~7 \times 10 ⁻²⁰	70	脉冲 25mj	0.745和0.80 μ 苯 激光器	1.066	[6]

偶合强度也小，荧光转化效率就高，阈值功率就较低。

从以上比较中，LNP 晶体的许多参数都比 Nd：YAG，NPP，KNP，NNP 等小型激光材料优越，根据以上分析，我们认为就目前已发表的这些高 Nd 浓度材料而言，LNP 比其它一些材料激光性能要好一些。

三、LNP 的 晶 体 生 长

LNP 晶体是一种非一致熔化材料，约960℃左右分解为 NdP₃O₉ 及熔液相^[23] 它不能用引上法从它本身的熔体中生长出来，一般系采用熔剂法和 Kyropoulos 法生长这种晶体。

H. Y-P. Hong^[24] 和 S. R. Chinn 等^[25] 用熔剂法生长了 LNP 晶体，原料为试剂纯的 Li₂CO₃，NH₄H₂PO₄ 和 Nd₂O₃，用过量的 Li₂CO₃ 和 NH₄H₂PO₄ 作为熔剂。用铂坩埚作容器，在200℃预热 4 小时后加热到950℃保温隔夜，然后以每小时 2℃的降温速度从950℃降到700℃为止，关闭电源。所得到的晶体是菱形薄片，厚度约0.2mm，线度为

$0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$, 宽晶面是〔001〕平面, a和b方向是晶面的对角线。袁刚等人〔3〕用熔剂法已生长出 $9 \times 4 \times 0.6 \text{ mm}^3$ 的透明晶体。

T. Yamada 等人〔13, 26—27〕采用了顶部放晶种的 Kyropoulos 法生长 LNP 单晶, 生长条件如下:

1. 溶液成分: $\text{Li}_2\text{O} : \text{Nd}_2\text{O}_3 : \text{P}_2\text{O}_5 = 4 : 2 : 25$ (克分子比),
2. 坩埚: 铂 (100ml)。
3. 单晶生长炉: 高频感应加热炉, 充 N_2 气。
4. 熔体冷却速度: $0.1^\circ\text{C}/\text{小时}$ 。
5. 晶体转速: 20—60转/分。
6. 晶体拉速: $0.1 \text{ mm}/\text{小时}$ 。

由于熔体成分含有大量的 P_2O_5 , 粘度大容易成为玻璃态。在感应炉中紧靠液面的温度梯度较大, 有使熔体强制固化的趋势, 熔体在晶体中形成夹杂物, 这一现象在晶体中心更为明显, 所得到的单晶为 2 mm—3 mm 见方的透明晶体。资料〔27〕报导, 已得到线度为 $10 \times 20 \text{ mm}$ 的透明晶体。我们估计用这种方法并适当加以改进可能会生长出较大尺寸的优质单晶。

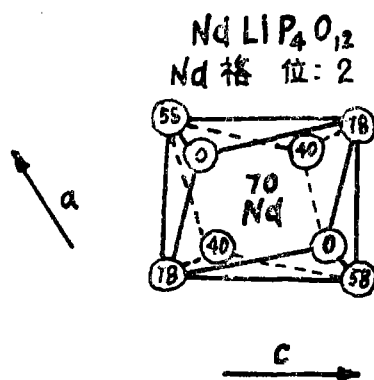
四、晶体结构与浓度猝灭

H. Y-P. Hong〔24〕和 K. otsuka 等〔2, 14〕研究了 LNP 的晶体结构。LNP 的结晶学特性列于表二中。他们指出, LNP 晶体中 Nd 离子间的连接是用 $(\text{PO}_3)_n$ 螺旋键来实现的, 每个 Nd 离子周围有 8 个氧原子, 形成单独的 NdO_8 十二面体 (见图一)。多面体的连接形式为 $\text{Nd}-\text{O}-\text{P}-\text{O}-\text{Nd}$, 这样, 每一个 NdO_8 多面体是孤立的, 而且被磷酸基螺旋链所隔开, 它们之间没有像一般 Nd 激光基质材料中的 Nd 多面体有公用的阴离子, 所以, 很自然地使人们把荧光寿命同晶体结构联系起来。

表二 $\text{LiNdP}_4\text{O}_{12}$ 的结晶学性质:

		K.otsuka 测定数据〔2〕	H. Y-P. Hong 测定数据〔24〕
晶系	单斜	单斜	单斜
空间群	$\text{C}2/\text{c} \sim \text{C}_{2h}^6$		$\text{C}2/\text{c}$
晶格常数 (Å)	$a = 16.45$ $b = 7.07$ $c = 13.25$ $\beta = 143^\circ 37'$		$a = 16.408$ $b = 7.035$ $c = 9.729$ $\beta = 126.38^\circ$
Z (分子/单位晶胞)	4		4
Nd 浓度 ($\times \text{cm}^{-3}$)	4.37×10^{21}		4.42×10^{21}
密度 (计算值)	$3.39 \text{ 克}/\text{cm}^3$		
折射率 (6328 Å)	1.58		

大家知道,在Nd离子间的激光跃迁出现在 $^4F_{3/2}$ 和 $^4I_{11/2}$ 能级之间。根据宇称定律,在相同的 $4f^3$ 电子组态间,电偶极子的跃迁是禁戒的。但在固体中, $4f^n$ 态的电偶极子跃迁可以发生,因为这时由最邻近的阴离子多面体的形变破坏了通过阳离子的反演对称性,造成了混合宇称的轨道(杂化轨道)。在稀土阳离子的情况下,主要是 $4f-5d$ 混合。电偶极子跃迁大体上按 $5d$ 混合态数值的平方变化, $4f^n$ 组态中的 $5d$ 混合又与阳离子位置的点称性有关,其混合的百分数随阴离子对反演位置位移的平方变化。这就是说,在Nd位置上,反演对称的偏离越大,则单独离子的辐射寿命就越短,荧光截面也越大^[28],所以增益就越大。



图一
LiNdP₄O₁₂中的Nd多面体。

在高Nd浓度晶体中,Nd离子间的非辐射相互作用缩短了电偶极子在亚稳态 $^4F_{3/2}$ 中的寿命,Nd浓度愈高,它的寿命就愈短,这种现象称为浓度猝灭。这就是说:能量由受激的Nd离子衰减转移到中间能级 $^4I_{15/2}$ 或 $^4I_{13/2}$ 上,同时附近基态的离子被激发到 $^4I_{15/2}$ 或 $^4I_{13/2}$ 态上。然后由无辐射跃迁一起回到基态中,晶格的振动补偿了任何微小能量的失配。这种现象主要是由激励中的离子之间相互作用的结果,其相互作用的强弱又与邻近离子间的距离有关。这样,我们就可以解释为什么在Nd当量比的激光基质中浓度猝灭很弱。

根据Hong^[24,30]的研究,只有基质材料中稀土多面体是相互隔离时,才能给出高掺杂水平的长寿命。NdO₈多面体的相互隔离将以两种方式影响着交叉弛豫的猝灭机理。其一,由于这种隔离,增加了Nd—Nd离子间的距离;其二,由于这种隔离限制了 $^4I_{15/2}$ 多重态的晶场分裂。这二种现象都使得它们的能量转移发生困难,对弱猝灭材料,其中阴离子——阳离子——阴离子连接基(如磷酸盐)中只连接相邻Nd离子间的一个键,对Nd多面体来说,他们没有公用的氧离子,所以晶体中Nd浓度为100%时,荧光寿命比仍然不大于2—3左右^[28]。

对Nd:YAG中的Nd多面体之间有一个共用边,这是造成浓度猝灭结构上的原因;当然,在Nd:YAG中($^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$)和($^4I_9/2 \rightarrow ^4I_{15/2}$)的能级间隔相近^[26],使交叉弛豫易于发生也是重要原因之一。Nd:YAG中的猝灭率 $c = 1 \times 10^{-42} \text{ cm}^6$ ^[2],它是LNP的20倍左右,况且在LNP等高钽材料中浓度猝灭随Nd浓度近似于线性增加,而Nd:YAG的猝灭随Nd浓度的平方增加,这足于表现了Nd离子之间的电偶极子的相互影响特性。

LNP的钽浓度比NPP高一些,但“荧光寿命比”却比NPP($\frac{\tau_0}{\tau_i} = 2.78$)稍小,在结构上的主要差别是LNP中的磷酸盐基是以螺旋形和Nd离子连结的;而NPP晶体中磷酸盐基以十字形平带连结^[28]。

几种高Nd浓度材料的结构与荧光特性列于表三中,为了比较,把Nd:YAG一起列入表中。

表三 几种Nd化合物的晶体结构和荧光寿命

化合物	空间群	Nd位置对称	Nd阴多面体中数	位参数D(Å)(a)	Nd多面体	荧光寿命(μS)			寿命比(τ ₀ /τ _f)	参考资料
						τ ₀ (x=0.01)	τ _m (x=m)	τ _f (x=1)		
Nd _x La _{1-x} LiP ₄ O ₁₂	C2/c	2	8	1.60	被隔离	325		135	2.41	11,21,29
KNd _x Gd _{1-x} P ₄ O ₁₂	P2 ₁	1	8		被隔离	275		100	2.75	11,19
Nd _x La _{1-x} P ₅ O ₁₂	P2 ₁ /c	1	8		被隔离	320		115	2.78	1,6,31
Nd _x Y _{3-x} Al ₅ O ₁₂	I3d	222	8	0.7	共边	230	(b) 149			28
CsNd _x Y _{1-x} NaCl ₆	Fm ₃ m	m3m	6		被隔离	4100		1230	3.33	30
Nd _x Y _{1-x} P ₃ O ₉	P2 ₁ /c	$\bar{1}$ 或1	6	(0.06)	被隔离	560~920	(c) 420-700			26,29
K ₃ Nd _x La _{1-x} (PO ₄) ₂	P2/m	m	7		被隔离	458		21	21.8	20
Nd _x La _{1-x} P ₃ O ₉	C222 ₁	2	8		共边	375		5	75	6,31
Nd _x La _{1-x} Na ₅ (WO ₄) ₄	I41/a	$\bar{4}$	8	1.37	被隔离	220		85	2.59	[6]
Nd _x Gd _{1-x} Al ₃ (BO ₃) ₄	I32	32	6		被隔离	50		19	2.63	6,7
K ₅ Bi _{1-x} Nd _x (MoO ₄) ₄	R $\bar{3}$ m	$\bar{3}$ m	6		被隔离	215		70	3.07	32,33

(a) 阴离子在反演位置上的平均位移, (b) x_m = 0.05, (c) x_m = 0.1。

五、LNP 的光谱性质和激光特性

T. Yamada 等^[2,26]用 Cary14R记录光度计测定 LNP 晶体的吸收光谱。a 平面最强吸收带 (⁴I_{9/2}→⁴F_{5/2}, ²H_{9/2}) 的吸收光谱示于图 2 (a) 中, 在 8000Å 上的峰值吸收截面 σ_a = 1.25 × 10⁻¹⁹cm²。图 2 (b) 表示了厚度为 43 微米的 LNP 晶体中 ⁴I_{9/2}→⁴F_{3/2} 跃迁的吸收光谱, 测得二个峰值 (分别为 0.870 和 0.866 微米) 的吸收截面分别为 σ_{R1} = 2.3 × 10⁻¹⁹cm² 和 σ_{R2} = 0.31 × 10⁻¹⁹cm²。

荧光光谱是用高压汞灯激发样品, 用光电倍增管测定, 在 LNP 中的 Nd³⁺ 有 4 组荧光线, 所得荧光光谱见图 3 (a) (b)。

到目前为止, 人们为研究 LNP 激光性能使用了各种泵浦源, 有 Ar 离子激光器^[12], 若丹明 6G 染料激光器^[31~35], 半导体激光器^[19] 和发光二极管^[36~37] 等。泵浦形式采用端泵浦或侧向泵浦。

资料 [13] 为了得到 LNP 的脉冲激光振荡, 用波长 5965Å 的染料激光来激励样品, 垂直射入晶片上, 晶体对泵浦光的吸收是 22% (晶片厚度 300 微米), 用透过率 T₁ 和 T₂ 分别为 0.1%

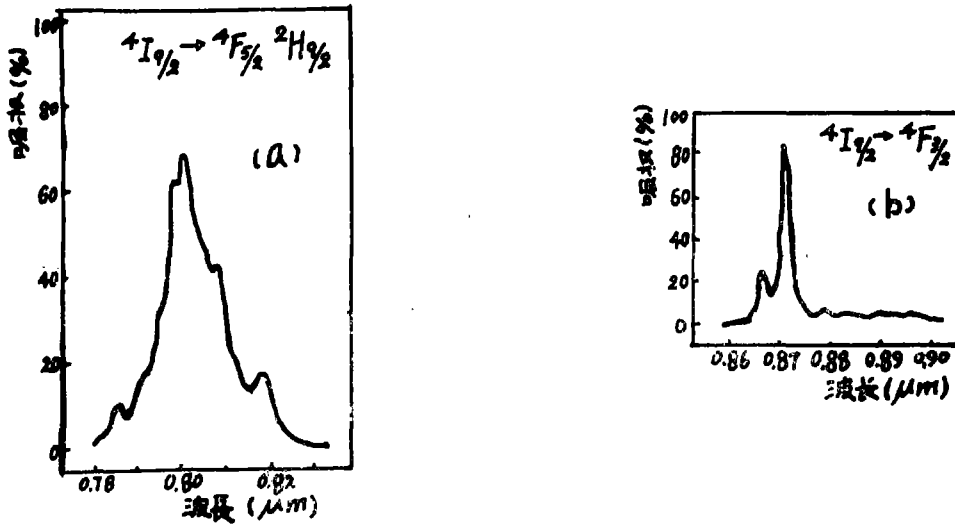


图 2 $\text{LiNdP}_4\text{O}_{12}$ 的吸收光谱

(a) a 平面最强吸收带 ($4I_{9/2} \rightarrow 4F_{5/2}, 2H_{9/2}$) 的吸收光谱

(b) 由 $4I_{9/2} \rightarrow 4F_{3/2}$ 跃迁的吸收光谱

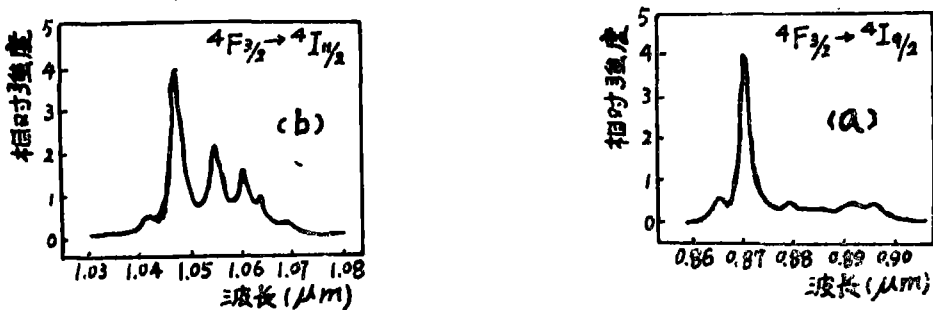


图 3 $\text{LiNdP}_4\text{O}_{12}$ 晶体的荧光光谱 (晶体厚度 $25\mu\text{m}$)

(a) 短波长荧光光谱

(b) 强谱带荧光光谱

和 2 % (对 1.0477μ) 的二反射镜构成的谐振腔中测定阈值, 所得数值为 140 微焦耳, 在晶片位置上的振荡光斑点尺寸为 180 微米。S. R. Chinn 等^[25]用波长为 0.582 微米的染料激光器泵浦 LNP, 测得阈值功率为 360 微瓦, 1.048 微米处输出 1 毫瓦功率时, 连续效率为 18%。

用 Ar 离子激光器 ($\lambda = 5145\text{\AA}$)^[38]作泵浦源, 横向泵浦时, 晶体对泵浦光的吸收为 50% (LNP 厚 0.3 毫米) 当 T_1 和 T_2 都固定为 0.1% 时, 得到阈值为 200 微瓦。资料 [19] 报导了用 Ar 离子泵浦测得最低阈值为 140 微瓦。

采用半导体激光器泵浦 LNP 晶体可以在室温下得到连续运转, 其泵浦阈值比 Ar 激光器泵浦大 10 倍^[19], 用 0.8 微米的 25 毫瓦半导体激光器泵浦时得到 3.8 毫瓦的激光输出, 斜率

17%，光转换率为15%。

资料〔36〕报导了用发光二极管泵浦的情况，这是一种比较有希望的泵浦形式，但它必须在低温下运转效果才能好，若在室温下操作其效率低，阈值高。今后应进一步研究在室温下得到高效率低阈值的工作条件，以便更好地满足实际需求。

六、LNP 激光器的发展方向

几年来，国外对 LNP 激光器的研究虽然做了不少工作，但距实用阶段还有一定的距离，其中的关键问题在于受到单晶质量的限制；另一方面，在激光器结构上还没有真正地完善。

现在，第一阶段的工作应该以研究生长优质单晶开始，其中包括：

- (1) 寻找适应于培育微型激光晶体的新工艺方法。
- (2) 改进现有的结晶炉结构，提高温度控制精度。
- (3) 进一步研究熔剂组份对晶体生长的影响。
- (4) 研究生长条件对晶体形貌的影响。
- (5) 微型晶体各种物理参数的测定。

我们认为，今后晶体的质量是可以得到改善的。

在 LNP 连续激光器件上，如何做到小型化，高效率，低阈值是一个必不可少的课题。以泵浦源的形式看来，用 Ar，Kr 及染料激光器作泵浦时，操作繁杂而且难于实现微型化。我们认为采用发光二极管阵列作为泵浦源是比较有现实意义的，因为它的发射波长(0.8 μ m)正好与 LNP 的吸收波长匹配，存在的问题是如何做到在室温下得到高效率低阈值的连续输出，所以必须对发光二极管进行一定的改进，这方面的工作已有所报导〔39〕。资料〔18〕报导用微型 Xe 灯（内径1mm，长度10mm）来泵浦 NPP 晶体得到了脉冲激光输出，Xe 灯的使用寿命达到了 10^6 小时，用这种方法泵浦 LNP 晶体也应该是可行的。因此，随着微型激光器的深入研究，LNP 激光器的实用阶段当指日可待。

参 考 文 献

- 〔1〕H. G. Danielemeyer, et. al. IEEE. J. Q. E. QE—8 805 (1972)
- 〔2〕K. Otsuka, et. al. IEEE. J. Q. E. QE—11 330 (1975)
- 〔3〕袁刚等，全国晶体生长与材料学术会议（论文摘要汇编）P63 (1979)
- 〔4〕胡百柳等，全国晶体生长与材料学术会议（论文摘要汇编）P62 (1979)
- 〔5〕陆宝生等，全国晶体生长与材料学术会议（论文摘要汇编）P57 (1979)
- 〔6〕H. Y—P. Hong, et. al. Mat. Res. Bull. 9 775 (1974)
- 〔7〕H. Y—P. Hong, et. al. Mat. Res. Bull. 9 1661 (1974)
- 〔8〕“激光与红外” 1973, No. 6, P1 [AD—734318, (1971)]
- 〔9〕C. A. Burrus, et. al. Appl. phys. Lett. 26 318 (1975)
- 〔10〕A. A. Kaminskii (a), et. al. phys. stat. sol. (a) 43 71 (1977)

- [11] H. Y—P. Hong, Mat. Res. Bull. 10 1105 (1975)
- [12] K. Otsuka, et. al. Appl. phys. Lett. 26 311 (1975)
- [13] 山田智秋等, “固体物现” 44 906 (1975)
- [14] 岩崎裕, “电子通讯学会志” 61 No5. 524 (1978)
- [15] K. Otsuka, et. al. J. Appl. phys. 48 2099 (1977)
- [16] 罗遵度, 激光晶体机理研究——光谱性能与结构因素的关系 (1977年晶体生长会议资料)

- [17] S. R. Chinn, IEEE. J. Q. E. QE—11 747 (1975)
- [18] S. R. Chinn, Appl. phys. Lett. 31 178 (1977)
- [19] M. Saruwatari, et. al. Appl. phys. Lett. 29 291 (1976)
- [20] Junichi Nakano, et. al. J. Appl. phys 47 2749 (1976)
- [21] S. R. Chinn, et. al. opt. Commun. 15 345 (1975)
- [22] S. R. Chinn, et. al. opt. Commun. 18 87 (1976)
- [23] J. Nakano, et. al. J. of American Ceramic soc. 59 172 (1976)
- [24] H. Y—P. Hong, Mat. Res. Bull. 10 635 (1975)
- [25] S. R. Chinn, et. al. Appl. phys. Lett. 26 649 (1975)
- [26] T. Yamada, et. al. J. Appl. phys. 45 5096 (1974)
- [27] 大塚建树等, “研究实用化报告” 27 No7. 1343 (1978)
- [28] S. R. Chinn, et. al. Laser Focus, May 1976 P64
- [29] H. G. Danielmeyer, et. al. Appl. phys. 1 269 (1973)
- [30] H. Y—P. Hong, et. al. Mat. Res. Bull. 11 461 (1976)
- [31] B. C. Tofield, et. al. phys. Rev. B10 4560 (1974)
- [32] H. Y—P. Hong, Acta. Cryst. B30 1857 (1974)
- [33] П. В. клевцов, и. Др. Кристаллография 20 57 (1975)
- [34] K. Otsuka, et. al. J. Appl. phys. 46 4600 (1975)
- [35] K. Kubodere, et. al. J. Appl. phys. 49 (1) 65 (1978)
- [36] M. Saruwatari, et. al. IEEE. J. Q. E. QE—12 584 (1976)
- [37] M. Saruwatari, et. al. Appl. phys. Lett. 27 682 (1975)
- [38] K. Otsuka, et. al. IEEE. J. Q. E. QE—11 845 (1975)
- [39] 猿渡正俊等, L—廿“——研究, 5 No3. 143 (1977)