

色性来做精确的多卜勒测量。虽然大多数光激射器比微波系统角度测量的精确度高几个数量级，但是对精密多卜勒测量它们的单色性都还不够。在波长为8,400埃时，每秒1呎的目标速度产生0.8兆赫的多卜勒频率。指望用GaAs光激射器来实现这样的精度是合理的。

多卜勒测时也是很重要的，并且对检测的最小增量必须有足够长的时间。例如，如果要测量的速度增量是每秒1呎，那么光多卜勒频率大约是1兆赫，而微波多卜勒频率大约是100赫。这样，用光学方法测量可在 10^{-6} 秒，而微波则需要用 10^{-2} 秒。

注入式光激射器还可以用于地面跟踪雷达，作为卫星的导航设备。在白天，宇宙飞行员用标准光电变象管从地球背景里辨出一个发射0.1焦耳脉冲，波束为 10^{-6} 球面度的GaAs光激射器是足够亮的。

目前，注入式光激射器已经达到发展的阶段，对于某些通信应用有着显著的优点。至于雷达应用方面，在光系统有效地超过微波系统之前，注入式光激射器、波束扫描技术和混频技术都还有待于进一步发展。

参 考 文 献

- (1) M. I. Nathan, et al., Appl Phys Letters 1, p 64 1962.
- (2) R. N. Hall, et al, Phys Rev Letters 9, p 366 1962.
- (3) T. M. Quist, et al., Appl Phys Letters 1, p 91 1962.
- (4) I. Melngailis Appl Phys Letters 2, p 176 1963.
- (5) I. Melngailis and R. H. Rediker Appl Phys Letters 2, p 202, 1963.
- (6) K. Weiser and R. S. Lviet, Appl Phys Letters 2 p 178, 1963.
- (7) Nick Holonyak, Jr., and S. T. Bevaqua. Appl Phys Letters 1, p 82, 1962.
- (8) I. Melngailis, A. S. Strauss, R. H. Rediker Proc IEEE (Correspondence) 51 p 54 1963.
- (9) R. J. Phelan, et al., Appl Phys Letters 3, p 143, 1963.
- (10) M. Pilkuhn, H. Rupprecht, and J. Woodall Continuous Emission From GaAs Diode at 77°K IBM. Research Note No-261.
- (11) W. E. Engler, M. Fartinkel, Solid State Devices. E. Lansing, Mich, June 1963.
- (12) G. Burns, et al, The Effect of Temperature on the Properties of GaAs Laser, Proc IEEE (Correspondence) 51, p 947, 1963.
- (13) T. M. Quist, et al, Appl Phys Letters 1 p 91, 1962.
- (14) Recently obtained at IBM.
- (15) P. P. Sorokin, et al, J. Appl Phys 34, p 2553, 1963.
- (16) C. T. McCoy, Space Communications Philips Report NR 279, Nov 1958.

译自 Electronics Vol. 36, № 50, (1963) p. 34

(王宏宇译，范果健校)

晶体与玻璃光激射器工作物质的制备(第2部分)

A. E. 帕拉笛诺

2. 恰克拉斯基生长法

佐尔福斯等人^[16]首先发表了应用维纳尔(Verneuil)方法和勃里季曼——斯托克巴克(Bridgman-Stockbarker)方法生长大块的CaWO₄晶体。后一种方法是把盛熔体的坩埚置于

大的溫度梯度下，使熔體慢慢地凝固。最近， CaWO_4 和其他白鎢礦類型的晶體已用恰克拉斯基法，生長出來了[17,18]。這種方法是採用高頻感應爐，在大氣中直接加熱鎢坩堝，晶種侵入熔體中，旋轉速率達到 100 轉/分，引上速率每小時達到 3 吋(見圖 2)。

當三價希土離子置換白鎢礦類型晶體中的鹼土離子時，因為價態的不同，所以需要電荷補償。在缺乏電荷補償子時，希土離子(如 Nd^{3+})的溶解度就會受到限制，電平衡是由 Ca 空穴維持的， $(\text{Ca}_{1-3x} \text{Nd}_{2x} \square_x \text{WO}_4)$ 。(關於晶體生長，電荷補償的細則請看訥紹等的著作[19-24])。應用 CaWO_4 及同晶物 $\text{Na}_{0.5} \text{Nd}_{0.5} \text{WO}_4$ 的固溶體可能得到較高的 Nd^{3+} 濃度，只有 Nd^{3+} 溶于 CaWO_4 中時，認為可以利用簡單的、與若干冶金體系相似的二元相圖表示平衡溶度是不符合實際情況的。實際上體系至少是三元的，當有過量的鈉(呈 Na_2WO_4 的形式)加到熔體中時，可能是四元體系。

理想的，單一電荷補償法對於受激光發射用晶體的摻雜程度是適用的。(比在 CaWO_4 中鈹的溶解度大)。用 Na 做電荷補償子，理想的置換的二個 Ca^{2+} ; $\text{Ca}_{1-2x} \text{Nd}_x \text{Na}_x \text{WO}_4$ 。只有在晶體生長的特殊情況下才能得到一與一的對應關係。

有電荷補償子時， CaWO_4 中 Nd^{3+} 的溶解度，可以用分佈係數 K 來描述。 K 是鈹在晶體中的濃度與在熔體中的濃度之比。訥紹[21]指出由於熔融時，電荷補償子的總數的變化， K 值變化很大。(圖 3)，這些數據只適用於在熔體中含有 1% Nd 的情況。有關鉀補償的詳細資料，在圖 4 中作了說明。鈹和鉀的分佈係數及鈹和鉀在晶體中的比例是與鉀的濃度相反。當鉀的濃度在溶解時大約為鈹的 5—6 倍時，則在晶體中，接近於一個 Nd^{3+} 對一個 K^{+} 理想的比。

用鈉作完全的電荷補償 $[\text{Na}]_m/[\text{Nd}]_m$ 的比值約 4—6。生長出的晶體的電子順磁共振譜指出，在比值小於 3 時， Nd^{3+} 佔有兩個不等邊的四面體對稱位置，對稱軸是晶軸 C。當比值超過 4 時， Nd^{3+} 只佔有一個四面體的對稱位置[26]。一般講，後一種晶體的閾值比前一種晶體低。

由於在 CaWO_4 中鈹濃度的增加，使壽命縮短，發射譜綫寬度增加，光激射的閾值降低[21][25]。如圖 5 所示。這可能是由於濃度所引起的較強的吸收或者是依靠單位體積內較多的作用離子而獲得較高的增益之故。在這種系統中，利用低閾值晶體實現連續工作，已經成功了。

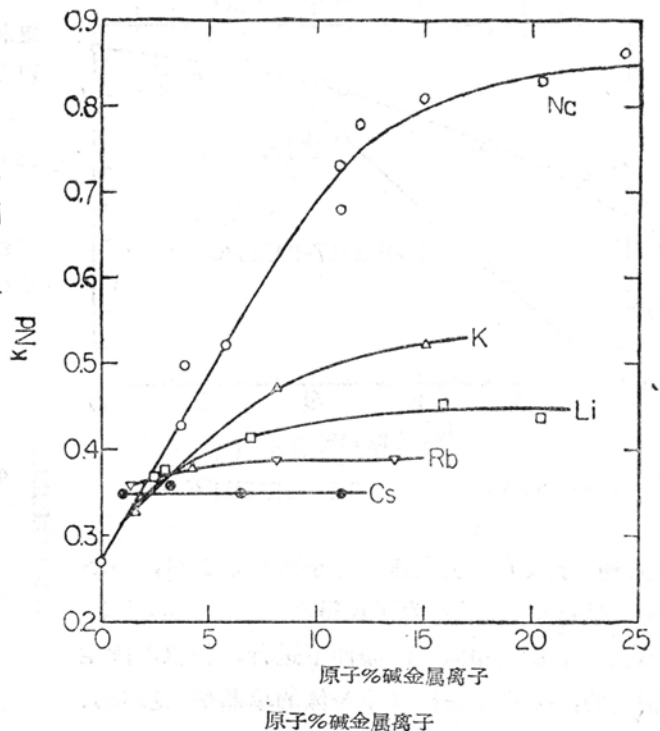


圖 3 碱金属离子对鎢酸鈣中 Nd^{3+} 分佈係數的影響。在熔體中 Nd^{3+} 為百分之一。(參照訥紹[21])

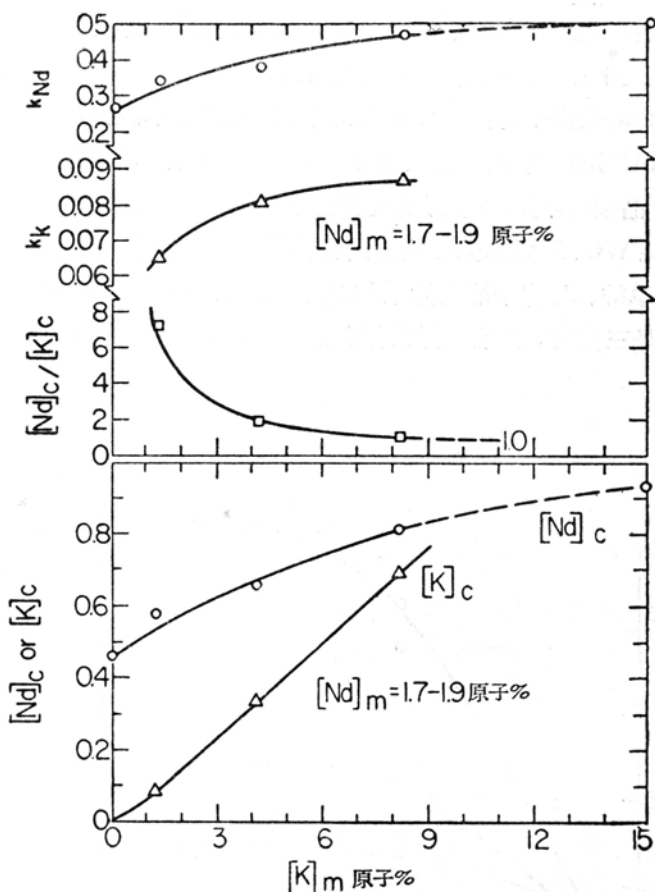


图4 钨酸钙中, Nd^{3+} 和 K^+ 的共分布。参照文献[20][23]

转速在 50 转/分以下, 引上速率每小时可达 2 吋, 虽然比较典型的是每小时一吋。为了获得高光学质量的晶体, 生长必须在无水蒸汽和氧气的条件下进行。所以晶体生长炉是密封的, 很象生长锗硅半导体的单晶炉(见图6)。使用过 $H_2 + He, A$ 和 HF 气体通过热的铜粉以除氧。水汽用适当干燥剂除去, (露点必须在 $-60^\circ F$ 以下)。另外 PbF_2 也可作为除氧剂, 生成氧化铅挥发并剩下相应的氟化物。除去水汽和氧是十分必要的。例如在 CaF_2 晶体生长中, 可以防止氧化钙的形成。氧化物在 CaF_2 中是不溶的, 并且会引起讨厌的光散射。如果在氟化钙中约含有 1% 的 CaO, CaF_2 就会呈乳白色。

稀土离子在 CaF_2 中(及表 I 中的其他氟化物)的溶解度是很大的。在某些情况下, 可完全互溶生成固溶

大约到了 1960 年, 卤化物单晶体, 特别是碱土氟化物晶体已经利用勃里季曼——斯托克巴格尔方法制备成功了。应用这种方法生长单晶固溶体, 有几点不利: (1) 由于正常凝固时的分凝作用, 杂质分布难于达到均匀; (2) 在生长过程中, 检测和控制都看不见晶体; (3) 必须采用慢的生长速率; (4) 对于最适用的, 亦是经常使用的坩埚材料——石墨, 也要与一些掺杂元素起反应。这种生长法还有一些别的问题, 但已经被克服了。

最近, 恰克拉斯基法已经用于氟化物单晶的生长, 采用钼做坩埚,

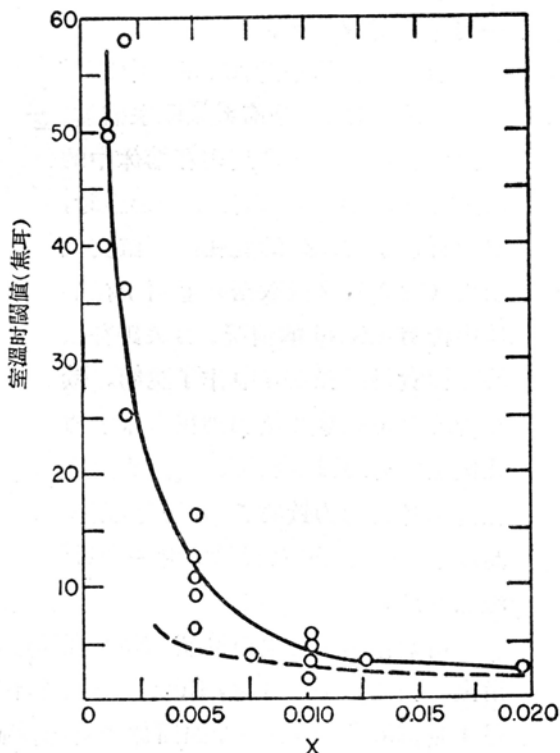


图5 光激射器的阈值与 $Ca_{1-2x}Nd_xNa_xWO_4$ 中浓度 X 的依赖关系, (掺入方法参照文献[21])

体。希土掺入Ca晶格中与二价Ca互相置换。在CaF₂中,已经找到了几种电荷补偿机构,它们和生长条件、杂质浓度、及晶体的热处理与退火有关。在希土离子处的晶体场和电荷补偿方法有关。对于好的光激光器特性而言,最重要的是整个晶体具有单一的位置对称。这种要求在希土掺杂的CaF₂晶体(和其他氟化物)生长中,需要特别注意。(有关补偿方法的完整的总结,见伟伯和拜里格^[32]的文章)。

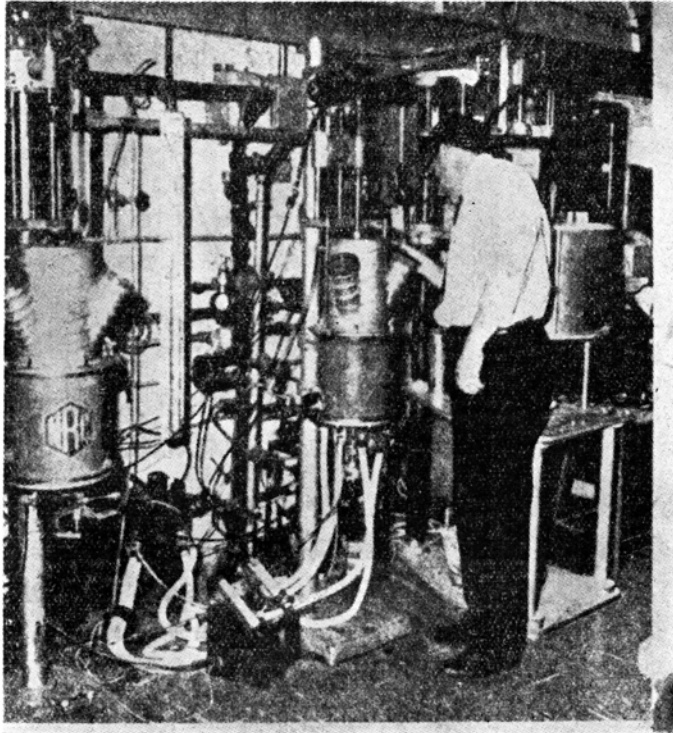


图6 照片在密封的充气炉中,氟化物晶体的恰克拉斯基生长法。

CaF₂中的电荷补偿,通常是一个三价的希土置换一个二价的钙和一个位于间隙中的F⁻它处于最相近的六个间隙位置之一^[33-37]。这导致一个希土位置对称的四面体的晶体场。但希土-F⁻偶,在高温和骤冷下会变成无序,电荷补偿局部失去,造成希土位置的立方对称^[34-38]。因此为了保证一种电荷补偿类型和晶体场的对称性,需要保持既定的慢的生长速率;或则缓慢地冷却到室温,进行长时间的退火。如果在晶体生长中,存在氧气或水蒸气,就增加了一种电荷补偿机构,可能形成一个三角形的晶体场^[39-42]。一个O²⁻离子,在相邻于三价希土占有的Ca位置的晶格上,替代一个F⁻离子。随着炉内气氛、生长速率及以后的退火等条件,可以有多种电荷补偿法及希土元素处晶格场的对称性,这是很清楚的。在制备均匀的,可重复的,质量优良的光激光器晶体时,需要特别留心。

二价希土加入到如CaF₂一类的基质中,很明显比三价希土要好。二价希土的4f-5d或4f-6s跃迁,在整个可见光范围内的吸收带比三价希土的的线吸收宽得多。二价希土宽的吸收带,降低了产生光受激发射所需的阈值。事实上,连续工作只是对于掺入氟化钙中的二价希土才是可能的^[14,43]。

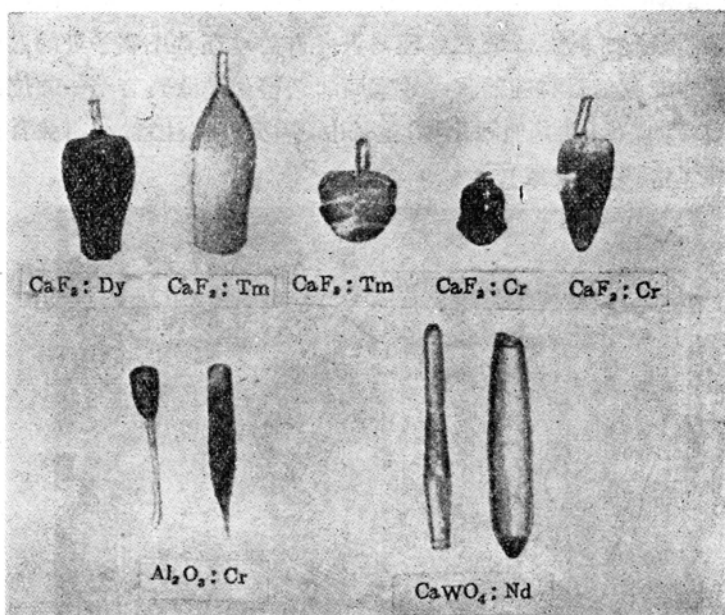
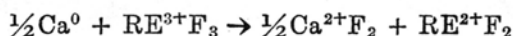


图 7 利用本文中討論的方法生长的几种典型的晶体。

从 La 到 Yb 的整个希土元素都有二价存在^[44]。但是，二价是不稳定的，掺入晶体中的还原后的希土，通常在室温下經长时间后就会氧化。（在受到光激光器泵辐射照射时，氧化进行得还要快一些）。使掺入氟化物中的希土形成二价，至少有五种方法：(1)用电离辐射照射掺杂晶体^[45,46]，(2)把晶体放在基质阳离子金属气氛中加热^[47]，(3)改变化学比，使基质金属相对于掺杂希土过剩。如 CaF_2 中的 Ca 金属。



(4)改变化学比，在熔体中加入过量希土金属



(5)在还原气氛中生长晶体。例如在 H_2 或真空中。以上所有方法对生成掺入晶体中的二价希土并不是都很有效的，这个问题正在广泛地进行研究。

用上述方法生长的一些晶体见图 7。

3. 玻璃

玻璃做希土元素的基质，有几个特殊的优点超过晶体。最突出的是；玻璃比较容易达到高的光学质量，能够制成各种尺寸和各种形状。而且，可以用调整基质玻璃成份改变玻璃的性质，如折射率、比重、化学稳定性、光吸收、荧光强度和綫寬。但玻璃有两种性能损害了它作为光激光材料的吸引力。这就是热传导和机械强度不良，这两种性能对热冲击是重要的。玻璃的热膨胀通常比晶体高，这也是个不足之处；但相差很小，只要适当调整玻璃的组分，可以使差别减少至极小。如果玻璃激光器的閾值能有效地降低，热冲击就不再是个严重的障碍。

把各种组分在一个合适的坩堝中(如陶瓷或铂坩堝)熔化就可以制成玻璃。氧化物、碳酸

盐、硫酸盐、硝酸盐及少量的粘土和长石都是玻璃的原始材料。虽然，有非氧化物玻璃，(有机的、元素的)但最主要考虑的是氧化物玻璃(有关玻璃的制造、组分及其性能的讨论见参考文献48—51)。

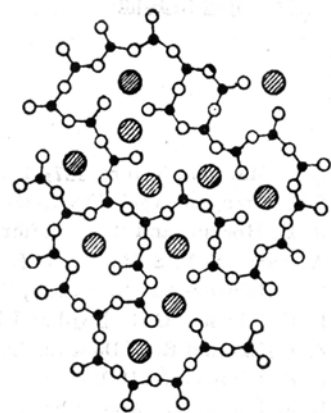
无机氧化物玻璃是由不规则的、三度的多面体网络所组成的，多面体为四面体或是三角形，它们在顶角处联结，有时是面联结。主要的玻璃形成体是多电荷低配位数的(小于4)。在表Ⅲ中列出了主要的玻璃形成体氧化物，并根据配位类型和在玻璃态中形成的多面体——四面体和三角形结构进行分类。有一类氧化物，虽然它们本身不能形成玻璃，但能够进入玻璃网络代替玻璃形成体的一种阳离子。这种氧化物称为中间体。还有一些氧化物，能够分裂联接三度多面体的链，从而完全改变玻璃的结构和性质。这些较大的网络外体离子(表Ⅲ)被安置在较大的空穴或玻璃间隙中。较大的高配位数的希土，大概具有类似于碱离子的环境。图8是沃兰^[52]描述的典型玻璃示意图。希土附近对称性的改变，大概可以解释玻璃光激光器宽的线宽。

表 Ⅲ. 无机玻璃的主要成分

玻璃形成体配位体

四面体	三角形	中间体	网络外体		
SiO ₂	B ₂ O ₃	BeO	Li ₂ O	MgO	Sc ₂ O ₃
GeO ₂	As ₂ O ₃	ZnO	Na ₂ O	CaO	Y ₂ O ₃
P ₂ O ₅	Sb ₂ O ₃	PbO	K ₂ O	ZnO	La ₂ O ₃
As ₂ O ₅		Al ₂ O ₃	Rb ₂ O	SrO	SnO ₂
		TiO ₂		CdO	
		ZrO ₂		BaO	
		ThO ₂		PbO	

在碱硅玻璃中，适当改变网络外体离子的种类和浓度，希土的荧光光谱和吸收光谱能够在很大的范围里改变^[52—57]。特别是，铽的吸收光谱，可以利用减小碱金属离子的大小而变宽。(在表Ⅱ中调节剂第一行)。利用较大的二价离子(表Ⅲ中调节剂第二行)也有类似的效果产生。一般来说，荧光强度由于碱离子大小的增加而减弱，寿命则增加。对二价网络外体，荧光强度和寿命随着离子大小的增大而增加。吸收光谱和荧光光谱，与所使用的各个玻璃形成体也有密切的关系。因为在表Ⅲ中大部份的组合都是可能的，所以产生同样数目的组份一性质的变更也是可能的。



● O²⁻ ○ 玻璃形成体和中间体 ● 调节剂和希土

图 8 钠硅玻璃结构的简单描划。大希土假定处在和碱离子同样的位置。

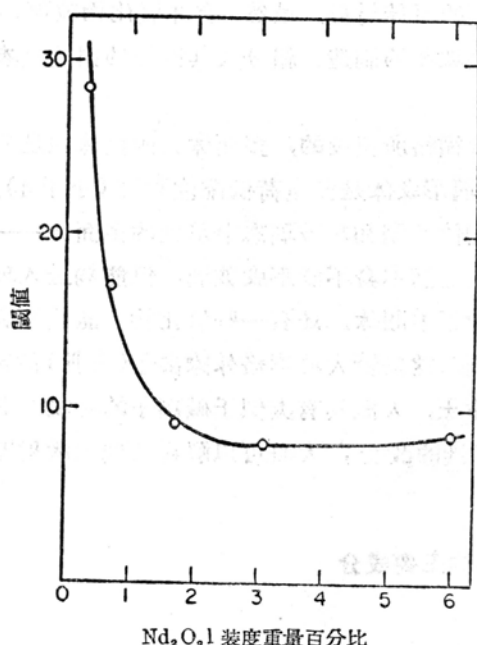


图 9 在钠硅玻璃中，光雷射器的閾值对于钕浓度的依賴关系。

有趣的是，注意在钕掺杂的钠钙硅玻璃中，寿命和光雷射器的閾值情况与一偏酸钙中的钕相类似。钕浓度增加时，寿命縮短，閾值降低到一个极小值(图 9)，再則，浓度效应淹沒了寿命的微小的縮短。

小 結

虽然，不能从理論上指出哪些固态介质掺上一定的离子后，可以产生受激发射，但是上面略述的一些晶体化学的条件，至少限制了所要考虑的系统的数目，大功率输出的需要，将会对光雷射器材料提出更多的物理性质上的要求。有前途的光雷射器系统可能会限制在一些高熔点的氧化物和某些玻璃方面。有关选择新系统的准则，决不限于上面提到的这些，但它们可能是最显著的。在此领域中的初期，其特点为大家热衷于寻找並发表光雷射器系统，今后

无疑会发现更有用的光雷射器的严格的方法給予更大的注意、列在表 I 中的光雷射器系统对于建立有用的器件，只有少数几个具有实际价值。红宝石仍然是最重要的，因为它的输出能量比所有其他的都高。找寻一个我們所期望的，完全具备红宝石物理性能的四能级系统，无疑是个重要的任务。在制备现有材料时所联想到的许多问题，在新材料的制备中可能会碰到。象电荷补偿方法，单一位置对称，光学完善，和掺杂浓度及其分布，只是被提到的部分问题。这些问题和其他一些问题在考虑大功率光雷射器用的高熔点化合物时，将会分别得到应用。

参 考 文 献

- 1a. T. H. Malman, Nature, 187, 493 (1960);
- b. N. C. Chang, J. Appl. Phys., 34, 3500 (1963);
- c. R. H. Hoskins and B. H. Soffer, Appl. Phys. Letters, 4, 22 (1964);
- d. A. Yariv, S. P. S. Porto and K. Nassau, J. Appl. Phys., 33, 2519 (1962);
- e. L. F. Johnson and K. Nassau, Proc. IRE, 49, 1704 (1961);
- f. L. F. Johnson, G. D. Boyd and K. Nassau, Proc. IRE, 50, 87 (1962);
- g. Z. J. Kiss and R. C. Duncan, Jr., Proc. IRE, 50, 1531 (1962);
- h. L. F. Johnson, G. D. Boyd and K. Nassau, Proc. IRE, 50, 86 (1962);
- i. L. F. Johnson, J. Appl. Phys., 34, 897 (1963);
- j. L. F. Johnson (unpublished data of L. F. Johnson and K. Nassau). J. Appl. Phys., 34, 897 (1963);
- k. A. Yariv, J. P. Gordon, Proc. IEEE, 51, 4 (1963);
- l. L. F. Johnson and R. R. Soden, J. Appl. Phys., 33, 757 (1962);
- m. L. F. Johnson (unpublished data of L. F. Johnson and R. R. Soden), J. Appl. Phys., 34, 897 (1963);
- n. A. A. Ballman, S. P. S. Porto and A. Yariv, J. Appl. Phys., 34, 3155 (1963);
- o. L. F. Johnson, J. Appl. Phys., 33, 756 (1962);

- p. P. P. Sorokin and M. J. Stevenson, *IBM J. Research Develop.*, 5, 56 (1961);
- q. Z. J. Kiss and R. C. Duncan, Jr., *Proc. IRE*, 50, 1531 (1962);
- r. L. F. Johnson, *J. Appl. Phys.*, 34, 897 (1963);
- s. S. A. Pollack, *Proc. IEEE*, 51, 1793 (1963);
- t. Z. J. Kiss and R. C. Duncan, Jr., *Proc. IRE*, 50, 1532 (1962);
- u. P. P. Sorokin and M. J. Stevenson, *Phys. Rev. Letters*, 5, 557 (1960);
- v. L. F. Johnson, *J. Appl. Phys.*, 34, 897 (1963);
- w. P. P. Sorokin, M. J. Stevenson, J. R. Lankard and D. G. Pettit, *Phys. Rev.*, 127, 503 (1962);
- x. A. Yariv and J. P. Gordon, *Proc. IEEE*, 51, 4 (1963);
- y. S. P. S. Porto and A. Yariv, *Proc. IRE*, 50, 1543 (1962).
- 2a. L. F. Johnson, *J. Appl. Phys.*, 34, 897 (1963);
- b. H. A. Bostick and J. R. O' Connor, *Proc. IRE*, 50, 219 (1962);
- c. R. Soloman and L. Mueller, *Appl. Phys. Letters*, 3, 135 (1963);
- d. L. F. Johnson (unpublished data of L. F. Johnson and H. J. Guggenheim), *J. Appl. Phys.*, 34, 897 (1963);
- e. L. F. Johnson, R. E. Dietz and H. J. Guggenheim, *Phys. Rev. Letters*, 11, 318 (1963);
- f. E. Snitzer, *Phys. Rev. Letters*, 7, 444 (1961);
- g. Electro-Optical Systems, Inc., Pasadena, California, Research and Investigation of Materials for Laser Applications, Contract No. AF 33 (657)-8918, Tech. Doc. Report No. ASD-TDR-63-603 (May 1963);
- h. H. W. Gandy and R. G. Ginther, *Proc. IRE*, 50, 2114 (1962);
- i. H. W. Gandy and R. J. Ginther, *Appl. Phys. Letters*, 1, 25 (1962);
- j. H. W. Gandy and R. J. Ginther, *Proc. IRE*, 50, 2113 (1962);
- k. H. W. Etzel, H. W. Gandy and R. J. Ginther, *Appl. Optics*, 1, 534 (1962);
- l. R. D. Mauer, *Appl. Optics*, 2, 87 (1963).
3. A. L. Schawlow and C. H. Townes, *Phys. Rev.*, 112, 1940 (1958);
4. A. L. Schawlow, *Liquid State Journ.*, 2, 21 (1961).
5. A. Yariv and J. P. Gordon, *Proc. IEEE*, 51, 4 (1963).
6. Raytheon Company, Theoretical and Experimental Study of Rare Earth Ion Fluorescence in Crystals, Contract No. AF 33 (657)-11211 (1963).
7. A. Verneuil, *Compt. Rend.*, 135, 791 (1902).
8. W. H. Bauer and I. Gordon, *J. Am. Ceram. Soc.*, 34, 250 (1951).
9. W. H. Bauer, I. Gordon and C. H. Moore, *ibid.*, 33, 140 (1950).
10. J. J. Gilman, editor, "The Art and Science of Growing Crystals," Chapt. 20, W. H. Bauer and W. G. Field, John Wiley, New York (1963).
11. R. A. Lefever and C. Wayne Clark, *Rev. Sci. Instr.*, 33, 769 (1962).
12. R. A. Lefever, *Rev. Sci. Instr.*, 33, 1470 (1962).
13. Linde Company, "Ruby Improvement for Lasers-Task I," Contract No. DA 36-039-SC-89089, Reports I-3 (1963).
14. The Perkin-Elmer Corporation, "Ruby Improvement for Laser-Task II" Contract No. DA 36-039-SC-89091, Report I-3 (1963).
15. Airtron, "Hydrothermal Growth of Large Ruby Single Crystals." Contract No. AF 33-(657)-10503, Interim Reports (1963).
16. S. Zerfoss, L. R. Johnson and O. Imber, *Phys. Rev.*, (Letters to the Editor) 75, 320 (1949).
17. K. Nassau and L. G. Van Uitert, *J. Appl. Phys.*, 31, 1508 (1960).
18. S. Preziosi, R. R. Soden and L. G. Van Uitert, *J. Appl. Phys.* 33, 1893, (1962).
19. K. Nassau and A. M. Broyer, *J. Appl. Phys.*, 33, 3064 (1962).
20. K. Nassau, Third International Symposium on Quantum Electronics, (to be published) February 11-15, 1963, Paris.
21. K. Nassau, Proc. Brooklyn Polytechnic Institute Symposium on Optical Masers, April 16-18, 1963, Polytechnic Press, Brooklyn, New York.
22. H. J. Leviustein, G. M. Loiacono and K. Nassau, *J. Appl. Phys.*, 34, 3603 (1963).
23. K. Nassau and G. M. Loiacono, *J. Phys. Chem. Solids*, 24, 1503 (1963).
24. K. Nassau, *J. Phys. Chem. Solids*, 24, 1511 (1963).

25. A. E. Paladino, B. D. Roiter and G. de Mars, *J. Appl. Phys.*, **35**, 249 (1964).
26. A. E. Paladino, B. D. Roiter and R. W. Bierig, unpublished data.
27. L. F. Johnson, G. D. Boyd, K. Nassau and R. R. Soden, *Phys. Rev.* **126**, 1406 (1962).
28. D. C. Stockbarger, *J. Opt. Soc. Am.*, **39**, 731 (1949).
29. H. Guggenheim, *J. Appl. Phys.*, **32**, 1337 (1961).
30. K. Nassau, *J. Appl. Phys.*, **32**, 1820 (1961).
31. H. Guggenheim, *J. Appl. Phys.*, **34**, 2482 (1963).
32. M. J. Weber and R. W. Bierig, Raytheon Company, Tech. Memo T-520 (December 2, 1963) (to be published in *Phys. Rev.* (1964)).
33. E. Zintl and A. Udgard, *Z. Anorg. Chem.*, **240**, 150 (1939).
34. R. W. M. D'Eye and F. S. Martin, *J. Chem. Soc.*, **349**, 1847 (1957).
35. R. W. Ure, *J. Chem. Phys.*, **26**, 1363 (1957).
36. B. Bleaney, P. M. Llewellyn and D. A. Jones, *Proc. Phys. Soc.*, (London) **69B**, 858 (1956).
37. J. M. Baker, W. Hayes, and M. C. M. O'Brien, *Proc. Roy. Soc. (London)*, **254A**, 273 (1960).
38. E. Friedman and W. Low, *J. Chem. Phys.*, **33**, 1275 (1960).
39. P. P. Feofilov, *Doklady Akad. Nauk, U. S. S. R.*, **99**, 731 (1954).
40. I. V. Stepanov and P. P. Feofilov, *Soviet Physics, Doklady* **1**, 350 (1957).
41. J. Sierro, *J. Chem. Phys.*, **34**, 2183 (1961).
42. J. Sierro, *Phys. Letters*, **4**, 178 (1963).
- 43a. A. Yariv, *Proc. IRE*, **50**, 1699 (1962);
- b. R. C. Duncan, Jr. and Z. J. Kiss, *Appl. Phys. Letters*, **3**, 23 (1963);
- c. L. F. Johnson, *Proc. IRE*, **50**, 1691 (1962).
44. Donald S. McClure and Zoltan Kiss *Proc. Brooklyn Polytechnic Institute Symposium on Optical Masers*, April 16-18, 1963, Polytechnic Press, Brooklyn, New York.
45. K. Przibrán, "Irradiation Colors and Luminescence" (Pergamon Press, Ltd., London, 1956).
46. P. P. Feofilov, *Optika i Spektroskopiya*, **1**, 992 (1956).
47. J. D. Kingsley and J. S. Prener, *Phys. Rev. Letters*, **8**, 315 (1962).
48. J. E. Stanworth, "Physical Properties of Glass," Oxford (1953).
49. Woldemar A. Weyl, "Coloured Glasses," The Society of Glass Technology, Sheffield, England. (1951).
50. G. W. Morey, "The Properties of Glass," Reinhold, (1954).
51. J. M. Stevels, *Philips Tech. Rev.*, **13**, 293 (1951/52).
52. B. E. Warren, *J. Am. Ceram. Soc.*, **24**, 256 (1941).
53. K. Rosenhaver, F. Weidert, *Glastech. Ber.*, **16**, 51, (1938).
54. A. R. Rodriguez, C. W. Parmelee and A. E. Badger, *J. Am. Ceram. Soc.*, **26**, 137 (1943).
55. Electro-Optical Systems, Inc., Research and Investigation of Materials for Laser Applications, Tech. Doc. Report No. ASD-TDR-63-603, Contract No. AF33 (657)-8918 (May 1963).
56. Corning (Glass Works, Glass Laser Research, Annual Tech. Rep., Contract No. Nonr-3833 (00) (June 28, 1963).
57. R. D. Maurer, *Proc. Brooklyn Polytechnic Institute Symposium on Optical Masers* April 16-18, 1963, Polytechnic Press, Brooklyn, New York.

譯自 "Semiconductor Products and solid state Technology"

Vol. 7, №7. (1964) pp. 20-25.

(黃德羣譯, 馬笑山校)