

# 綜 合 評 述

## 激 光 材 料 的 選 擇

R. H. 霍斯金斯

为光激射器装置的实际应用，设计工程师必须能独立地估价(1)光学泵浦激发的(晶体和玻璃)光激射器，(2)注入式(半导体)光激射器以及(3)气体光激射器的基本材料。这些材料的特性将在下面进行分析，并着重讨论光学泵浦激发的材料，因为它比其他两种包括更多的因素。

### 光 学 泵 浦 激 发 的 材 料

为了对这些材料统一考察，必须考虑激活离子和掺入激活离子的基质晶体二者的参量。在能量激励(泵浦)下，它们之间相互作用就产生了激光发射。

#### 激 活 离 子 的 参 量

表 1 列入一批激活离子、其相应的性质和重要的实用基质材料。所有列入的离子(除  $\text{Cr}^{+3}$  外)都是属于四能级系统类型。这些离子的掺入是有利的，因为它们对获得导致受激发射所要求的集居数反转，只需有限的激发能量(为了解释这些现象，参阅图 1)。要想充分利用这些特点，对于大多数的四能级离子系统，必须使用冷却装置，通常冷却到  $77^\circ\text{K}$  液氮温度或者更低些。

### 元 素 符 号 注 釋 \*

符 号	元 素	符 号	元 素	符 号	元 素	符 号	元 素
Al	鋁	Ga	鎘	Mn	錳	Sm	鈔
Ar	氬	Gd	釷	Mo	鉬	Tb	鈹
As	砷	Ge	錳	Na	鈉	Te	碲
Ca	鈣	H	氫	Nd	釹	Tm	鐳
Ce	鈰	Hg	汞	Ne	氖	U	鈾
Co	鈷	He	氦	Ni	鎳	W	鈳
Cr	鉻	Ho	釹	O	氧	Xe	氙
Cu	銅	I	碘	P	磷	Y	釷
Dy	鐳	In	銦	Pb	鉛	Yb	釷
Er	鉕	Kr	氪	Pr	鉕	Zn	鋅
Eu	鈾	La	釷	Sb	銻		
F	氟	Mg	鎂	Se	硒		

\* 所引入之元素为文中用到者

注：用 RE 表示一般的或特殊化合物中的稀土元素(如 Dy 和 Nd)

表 1 激光离子的特性

离子	主要发射波长 (微米)	其他可能波长 (微米)	目前最有实用意义的基质	温度 (K°)
Eu <sup>+3</sup>	0.61		螯合物	300
Pr <sup>+3</sup>	0.6	1.05 <sup>(1)</sup>	LaF <sub>3</sub>	77
Cr <sup>+3</sup>	0.694	0.693 <sup>(2)</sup>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	300
Sm <sup>+2</sup>	0.71		CaF <sub>2</sub>	20
Yb <sup>+3</sup>	1.0		玻璃 <sup>(3)</sup>	77
Nd <sup>+3</sup>	1.06	1.08 <sup>(4)</sup> 0.9 <sup>(5)</sup> 1.34 <sup>(6)</sup>	钇铝石榴石 (Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> )	300
Er <sup>+3</sup>	1.6		玻璃 <sup>(7),(8)</sup>	300
Ni <sup>+2</sup>	1.6		MgF <sub>2</sub>	77
Tm <sup>+3</sup>	1.9		CaMoO <sub>4</sub> <sup>(9)</sup>	77
Ho <sup>+3</sup>	2.0		CaMoO <sub>4</sub> <sup>(9)</sup>	77
Co <sup>+2</sup>	1.99, 2.06		MgF <sub>2</sub>	77
Dy <sup>+3</sup>	2.36		CaF <sub>2</sub>	77
U <sup>+3</sup>	2.6	2.5 <sup>(10)</sup>		300

(1) 在 CaWO<sub>4</sub> 中;

(2) 在 77°K;

(3) 从 Nd<sup>+3</sup> 中传递能量;

(4) 在 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中;

(5) 77°K 时, 在 CaWO<sub>4</sub> 中, 抑制 1.06 微米;

(6) 抑制 1.06 微米;

(7) 从 Yb 中传递能量;

(8) 77°K, 在 CaWO<sub>4</sub> 中, 大概钇铝石榴石也可以;

(9) 从 Er<sup>+3</sup> 中传递能量;

(10) 稀释晶体

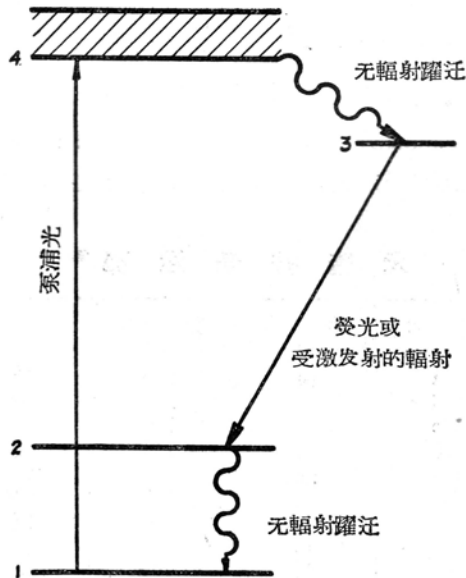


图 1 典型荧光固体的能级图

能级 1 是体系的基态。能级 4 是离子吸收了泵浦光后, 跃迁而达到的相当宽的能级。从能级 4 离子由于相互作用而无辐射跃迁到附近的亚稳态或为发光能级 3, 然后离子发射出相应于能级 3 到 2 之间频率的辐射。最后, 离子从荧光的终态能级 2 又开始相互作用后回到附近的基态。

虽然离子的集居数反转是激光发射的必要条件，但第二个必要的条件是：当光波通过激光晶体时，能量的增加必须足以克服由于端面不完整反射的损失，以及由于基质晶体散射或残余吸收的损失。通常，端面反射器的损失是主要的。

为了对泵浦光的要求降到最低限度，希望工作物质的某些参量尽可能的大。它们与泵浦截面(每一离子的吸收系数)、激光跃迁截面(每一离子的增益)、荧光态的寿命和激光离子的浓度<sup>[1]</sup>相关。这些参量列于表2。

表 2 激光离子参量的摘要

参 量	未 来 期 望 的
泵 浦 截 面	大 <sup>(1)</sup>
泵 浦 带 宽	宽 <sup>(2)</sup>
荧 光 寿 命 (辐射寿命)	作为高增益三能级材料的连续运转，要长。 作为四能级连续运转是无所谓的。 脉冲运转，要长。
荧 光 光 谱	简单
荧 光 线 宽	窄 <sup>(3)</sup>
浓 度	均匀泵浦，高增益、有害的相互作用效应的折衷方案 <sup>(4)</sup> 。

- (1) 实际泵浦时，将不可能太大。
- (2) 主要吸收带的波长也很重要。例如，若准备用钨灯泵浦在紫外区的泵浦带无用的。
- (3) 对四能级系统较窄的线宽，每一离子有较高的增益和较低的阈值。
- (4) 以对生长后的激光材料分析得到其浓度，因为最后产生的结构可以与最初的结构有明显的不同。

### 敏化离子技术

最近发展的激光新技术是利用称为敏化剂的第二种加入离子。简单地说，此离子吸收了泵浦能量，并将此能量传递给第一种激活离子，如图2所示。

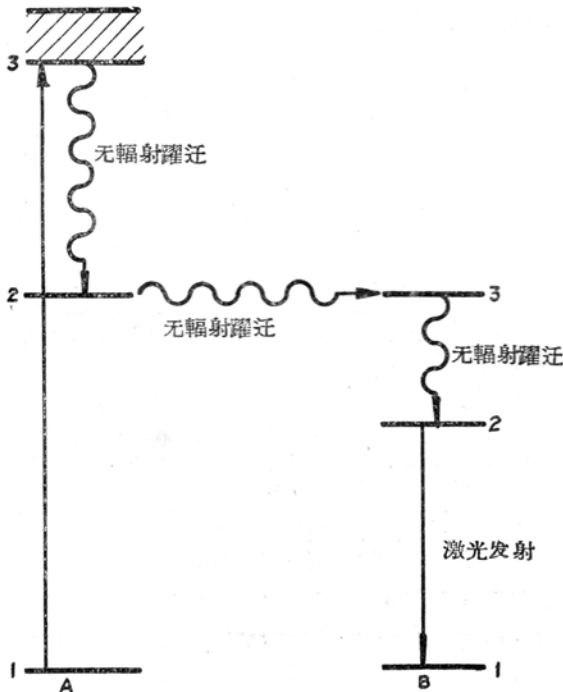


图 2 由第二种加入离子吸收光，使掺杂离子敏化发光的能级图

以敏化离子 A 在泵浦带 3 吸收光。离子 A 经过无辐射跃迁到亚稳态 2，并将能量传递给处于能级 3 的离子 B，离子 B 再无辐射跃迁到其亚稳态或为发光能级 2。在离子 A 不存在时，泵浦辐射将简单地通过晶体而无吸收地传递给离子 B 而获得激光发射。

由于附加了敏化剂的吸收带，故泵浦带的有效值增加了。

这种技术有希望提供较大效率和较低的阈值的激光运转。这一类型的某些相互作用示于表 3。所期望的实验结果已有报导。例如，将铬离子( $\text{Cr}^{+3}$ )掺入掺钕钇铝石榴石[( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ): $\text{Nd}^{+3}$ ]中，当用高压汞弧灯<sup>[2]</sup>泵浦此一工作物质时，连续运转的阈值显著地降低。

表 3 离子与离子能量交换和基质材料

敏化剂和激活离子	基 质 材 料
Yb → Er	玻 璃
$\text{UO}_2^{+2}$ → Nd	玻 璃
$\text{Ce}^{+3}$ 和 $\text{Cu}^{+}$ → $\text{Tb}^{+3}$	玻 璃
$\text{Mn}^{+2}$ 和 $\text{Ce}^{+3}$ → $\text{Nd}^{+3}$	玻 璃
$\text{Cr}^{+3}$ → $\text{Nd}^{+3}$	钇铝石榴石( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ )
Tb → Eu	(碱金属, 稀土) $\text{WO}_4$
Sm → Eu	$\text{Y}_2\text{O}_3$
Nd → Yb	( $\text{Na}_{0.5}\text{RE}_{0.5}$ ) $\text{WO}_4$
Nd → Yb	玻 璃
Ce → Nd	玻 璃
Er → Tm	$\text{CaMoO}_4$ , $\text{Er}_2\text{O}_3$
Er → Ho	$\text{CaMoO}_4$
$\text{Tm}^{+2}$ → $\text{Tm}^{+3}$	$\text{CaF}_2$

最近, $\text{Er}_2\text{O}_3:\text{Tm}^{+3}$ 的低阈值连续运转已经获得;在这里全部基质晶格都起敏化剂作用<sup>[3]</sup>。

### 基质材料

激光基质材料可粗略地分成晶体、气体和液体(包括玻璃状的有机体)等三大类。最常用的基质材料列于表 4。希望基质材料具有: 制备容易、坚硬(防止由于尘埃使光学抛光度降低)、对周围环境是化学性稳定和坚固的等等性质。

表 4 光泵光激光器的基质材料

工作物质	适当的掺入	解 释
氧 化 物 $\text{Al}_2\text{O}_3$ $\text{Y}_2\text{O}_3$ $\text{Gd}_2\text{O}_3$ $\text{La}_2\text{O}_3$	$\text{Cr}^{+3}$ 三价稀土离子 " "	硬度一般, 粗糙, 耐熔。 大尺寸可能性, 好的光学质量。 立方晶体, 光学质量一般。 单斜晶系, 光学上双轴的。 由于包围着的水蒸汽分解引起的反应。
白 钨 矿 $\text{CaWO}_4$ $\text{CaWO}_4$	" "	其他, 没有广泛地被采用, 包括 $\text{SrMoO}_4$ 等。 某些机理问题(容易解释)。 大尺寸的光学质量要求很纯。
氟 化 物 $\text{CaF}_2$ $\text{LaF}_2$	" "	其他, 没被广泛采用, 包括 $\text{BaF}_2$ 和 $\text{SrF}_2$ 。 因为对掺三价稀土离子的钇铝石榴石或 $\text{CaWO}_4$ 是不满意的。 在小尺寸时有好的光学质量, 色心问题。
榴 榴 石 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	"	稀土铝石榴石的某些化合物在研究中。 掺 $\text{Nd}^{+3}$ 钇铝石榴石目前的阈值是最低的。
玻 璃	"	大尺寸有可能; 最好的光学质量, 露光过多以致晒坏。
螯 合 物	"	液体媒介物, 有大尺寸可能性。至今只成功 $\text{Eu}^{+3}$ 合物。

即使基质材料的主要特性也可能由于存在掺入的离子而受影响。但其光学质量仍是最重要的因素。考察光学均匀性因素，应该包括折射率的均匀性及无杂质、无空隙或其他散射中心等。

低劣的光学质量使基质材料的振荡阈值提高，在那种迫不得已的情况下，离子的增益就显得很重要（在四能级工作物质中）。光束的发散角在许多需要高亮度（单位面积单位光束立体角内的功率）的应用中，也是一个重要因素。

另外，要求基质材料的性质是能够抵抗产生感应色心的辐射。这些色心吸收泵浦光或激光致使光激励器性质急剧地下降。

### 基质——离子的相互作用

基质晶体与掺入离子之间的各种相互作用限制了有效的光激励器组合的数目。相互作用强弱的因素，包括离子半径的大小、离子价态以及光谱的性质。

掺入离子与基质离子之间的离子半径大小不同，使得可以取代的掺杂量非常小（这表明“基质与掺入离子之间存在最不利的分配系数”的情况）。象三价稀土离子掺入到青玉晶格中去就是这种情况。 $\text{Al}^{+3}$  离子的离子半径约为 0.5 埃；而三价稀土离子的离子半径为 0.9 埃左右。

即使掺入的离子量适度，但掺入离子和基质离子的离子半径大小或价态不同，将产生应力。例如，纯钨酸钙( $\text{CaWO}_4$ )的光学质量比掺入三价激光离子的  $\text{CaWO}_4$  要好得多。

掺入离子的价态应与被取代的基质离子的价态一致。若这一点不可能做到，则必须用几种电荷补偿方式维持电中性。对于掺钕钨酸钙( $\text{Nd}^{+3} : \text{CaWO}_4$ )，在晶体生长的时候，可以掺入第四种离子( $\text{Na}^+$ )进行补偿，这样可收到一定的功效。起电荷补偿作用的晶体结构中的空位可能是闪光灯感应色心的来源。

在有些情况下，晶体生长后需要进行价态处理。 $\text{CaF}_2 : \text{Dy}^{+2}$  系统就是一个例子。目前最好的激光晶体是先生长掺  $\text{Dy}^{+3}$  的晶体，然后以  $\gamma$  射线辐照，使其中的  $\text{Dy}$  成二价状态。

激光离子的光谱性质可能与基质相互作用而受到多方面的影响。跃迁几率（泵浦和激光截面）依赖于由激活离子周围的离子所产生的局部电场。在那里，晶体电场是反对称的，电偶极子跃迁是被严格禁戒的，并且可以得到长的荧光寿命。

以  $\text{LaAlO}_3 : \text{Cr}^{+3}$  来说明， $\text{LaAlO}_3 : \text{Cr}^{+3}$  的辐射寿命比红宝石长 10 倍。荧光宽度与分支比率也会受到影响。这种效应对激光离子的作用也有深刻的影响；例如， $\text{CaWO}_4 : \text{Pr}^{+3}$  光激励器的近 1.1 微米处和  $\text{LaF}_3 : \text{Pr}^{+3}$  光激励器的近 0.6 微米处的荧光分布不同<sup>[4][5]</sup>。

### 玻璃具有制成大尺寸的可能性

掺入某种稀土、特别是掺  $\text{Nd}^{+3}$  的玻璃是重要的基质材料。其突出的优点（与晶体材料比较）是作高能应用时可制成很大的尺寸。通常可制成有用的棒长几呎，直径超过 1 吋。能够做到光学质量极好，并且光束角接近衍射极限（然而在拉制较长棒有困难的情况下，光束角一般超过 1 毫弧）。玻璃当然是容易制造并且容易获得良好的光学抛光。

### 玻璃的缺点包括：

1. 通常阈值比晶体高，主要是因为玻璃中的荧光谱线宽度较大。

2. 由闪光辐射感应而生的严重着色的缺点。滤去了辐射中的短波长部分，这一损耗将会稍稍降低钽玻璃的输出。

3. 由于激射光束的相互作用，高尖峰功率钽玻璃光激射器存在内部损伤。估计这种效应是由于材料的不纯所致；发展较纯的材料可以消除这些效应。

一种晶体-玻璃混合型激光材料(多晶  $\text{CaF}_2 : \text{Dy}^{+2}$ ) 已被制成，它是将含  $\text{Dy}^{+3}$  的  $\text{CaF}_2$  粉末在真空中加热并加压而制成的。前面所描述的 Dy 价态还原处理，这里用来实现“热压”材料。这种方法对  $\text{CaF}_2$  是可取的，因为它是立方晶体，并且是光学上各向同性的。因此，晶体颗粒取向杂乱无章并不影响材料的光学性质。

### 有机-金属化合物基质

金属离子可以与大的有机分子结合形成一种有机-金属化合物称之为螯合物。在三价稀土螯合物中，分子的有机部分吸收泵浦光并传递能量给稀土离子，因此激发了稀土的荧光。

螯合剂的吸收带是又宽(典型的情况为 600 埃左右)又强，并且传递效率又是很好的。类玻璃的有机溶液基质材料中， $\text{Eu}^{+3}$  螯合物在低温处已获得激光运转。最近，液体基质<sup>[7]</sup>在室温下也能进行运转。

虽然从理论观点来说要求螯合剂有大的吸收系数，但在实际情况下，问题就发生在泵浦的均匀性上。即使对一个非常薄(1 微米)的样品，泵浦大多数发生在样品的外面边缘上。而样品的内部则只在吸收曲线的两翼处有泵浦，那些地方只有较低的泵浦截面。

### 高能量应用

高能量激光应用的关键因素是尺寸和效率。目前这方面用的材料只有红宝石与钽玻璃两种材料在竞争。假如对亮度有要求(窄的光束发散度)，光学质量也是一项重要的要求。

红宝石(化学上,掺铬的氧化铝)有许多作为激光材料所期望的性质。它在光谱的绿色-紫色区域中的泵浦带是相当宽的，并且其泵浦吸收截面是大得足以保证有适当的阈值。其量子效率很高，并且荧光光谱很简单，晶格结构是硬的、坚固的和化学不活泼的。

红宝石的光学质量近几年得到很大的改进。红宝石是用维涅耳的老方法或火焰熔融法生长。改进这种生长过程曾制造出光束角在 2 毫弧度范围以内的大红宝石。最近，已发展用引上法在熔盐中拉制红宝石(图 3)。这样生长的红宝石有较高的光学质量，并且光束发散

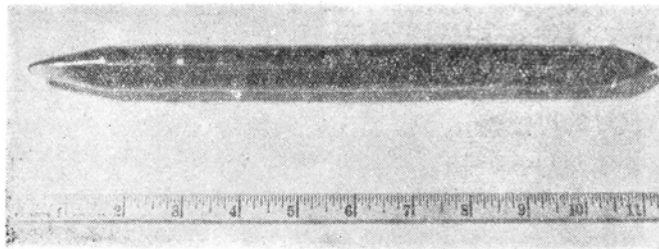


图 3 红宝石是迄今用得最广泛的光泵激光材料。最近用维涅耳(火焰)法生长的合成红宝石的最大尺寸约为直径  $1\frac{1}{2}$  吋、长 18 吋。图中示出的为林德公司用熔融牵引法生长的红宝石。

角很窄。最近用维涅耳法产生的红宝石最大尺寸，直径为 1.5 吋左右，长度为 18 吋。

玻璃基质材料的特性早已讨论过。Nd<sup>+3</sup> 的泵浦带在玻璃中变宽了，从效率观点上说这是有利的。由于荧光谱线宽度也比较宽，这就提高了阈值，这点在高能应用中是不重要的，因为这时光激励器受到比阈值强度大很多倍的光泵所激发。

### 高峰值功率之必要性

作为高峰值功率  $Q$ -突变应用，红宝石与钽玻璃再一次被提出来。尺寸不是重要因素。激光棒的长度是被限制在一个值上，这个值将保持在作为虚构反射镜的自发振荡所须要的总增益之下。理想的情况，光激励器的截面值（每一离子的增益）应是很低的。在这样的条件下，于自发振荡发生前，离子可被泵浦到贮存大量能量的情况下。例如，玻璃中 Nd<sup>+3</sup> 具有宽的荧光谱线宽度和较低的截面，是一种比在晶体基质中 Nd<sup>+3</sup> 更合适的能量贮存介质。

在实验材料中更使人感兴趣的是铝酸镧晶体 (LaAlO<sub>3</sub>)，它具有对称分布的离子，因而有长的荧光寿命。这就满足了作为低截面和较大能量贮存能力的材料。

### 連續运转

若干种激光材料已获得连续运转：在 77°K 下运转的有 CaF<sub>2</sub>:U<sup>+3</sup> (参考文献 [8])、CaF<sub>2</sub>:Dy<sup>+2</sup> (参考文献 [9]) 和 Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Tm<sup>+3</sup> (参考文献 [3])；在室温下运转的有红宝石 (参考文献 [10])、掺钽 Nd<sup>+3</sup> 的玻璃 (参考文献 [11])、CaWO<sub>4</sub> (参考文献 [12])、Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (参考文献 [13]) 和 CaMoO<sub>4</sub> (参考文献 [14])。作为连续运转材料的主要要求是低阈值。

**掺镱氟化钙：**所有光泵激发的激光材料中 CaF<sub>2</sub>:Dy<sup>+2</sup> 的阈值是最低的，特别在红外区，它呈现强而宽的泵浦带，并且有一非常窄的荧光谱线宽度。由于镱离子 (Dy<sup>+2</sup>) 的不稳定性，这种激光材料不可能在超过 77°K 的温度下运转。高于这一温度，在泵浦辐照下，Dy<sup>+2</sup> 就很快地转换成 Dy<sup>+3</sup>。

CaF<sub>2</sub>:Dy<sup>+2</sup> 光激励器的光谱线宽度很窄，对调制是很方便的，因为激光跃迁频率可以用外加磁场 (塞曼效应) 来改变的。因此，宁可稍加些磁场以使得频率在共振腔波型频率左右摆动。另外，在不均匀磁场中，谱线可增宽外延，并由于增益的不足振荡就全部停止。

**红宝石：**经过细致考虑泵浦的光谱结构，高压汞弧灯的光谱输出 (特别在绿色区) 和激励红宝石的泵浦带是匹配的，故使连续运转成为可能的。

**掺钽石榴石：**掺钽的若干种基质材料仍在继续运转者之中，钇铝石榴石 (Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>) 是目前具有最低的阈值以及将来最有可能作光学质量上进一步改进的材料。

## 注入式激光材料

### 运转机理

虽然和光泵激发的光激励器有联系的许多概念可以用到注入式或半导体光激励器上来，但仍有本质上的差别。其中砷化镓 (GaAs) 光激励器的运转<sup>[15]</sup>是这类光激励器中第一个成功的光激励器，它可用来描述基本机理。

这类光激励器的运转依赖于  $P$ - $n$  结的性质。通常以  $P$ -型层和将 Zn 或 Cd 扩散到不太纯的  $n$ -型 GaAs 中而形成的，每立方厘米中含有  $10^{17}$ — $10^{18}$  的载流子 (由 VI 族元素掺杂而来)。

若这种结的正向加以偏压，电子注入到  $P$ -区就可以得到光子发射的结果。发射是由于电子从导带跃迁到价带或者跃迁到稍高于价带的杂质受主能级所致。

注入式光激光器中辐射的净发射供给一个类似于光泵激发的四能级光激光器情况。由电子注入来达到集居数反转的。达到激光运转的条件是复合辐射的发射速率足以克服激光系统的损失。

### 激光过程的效率

其他重要的考虑是辐射的复合过程的效率和激活区的损失。这与光泵激发的激光材料的荧光量子效率相似，我们希望每个注入电子发射辐射，而不以某种无辐射过程进行再复合。激活区的可能产生损失的原因是自由载流子的吸收；经过计算<sup>[16]</sup>这种过程的损失足以妨碍镉的激光运转。

激光作用开始要求的阈值电流依赖一些参量。这些参量是激光材料的特性，并受外部条件(例如，温度和磁场)的影响。最后，发射波长(也是材料的特性)直接与禁带的能量相关。各种注入式激光材料列于表 5。

表 5 注入器(半导体)激光材料的波长

工 作 物 质	波 长 (微 米)
Ga(As <sub>x</sub> P <sub>1-x</sub> )	0.64 到 0.84(77°K)
GaAs	0.90(300°K); 0.84(77°K)
InP	0.91(77°K)
GaSb	1.6(20°K)
In(P <sub>x</sub> As <sub>1-x</sub> )	1.6(77°K, $x=0.49$ )
(In <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> )As	2.1(2°K, $x=0.75$ )
InAs	1.8(2°K, $x=0.25$ )
InSb	3.1(77°K)
PbTe	5.1(2°K)
PbSe	6.5(12°K)
	8.5(12°K)

### III-V 族化合物

**砷化镓:** 目前，从实用观点来看砷化镓 (GaAs) 是最重要的注入式激光材料。其复合辐射过程的效率非常高，并且制备材料的工艺(即晶体生长和掺杂过程)已经发展得很完备。77°K 时，激光发射波长约为 8,400 埃，室温时，由于温度使禁带发生变化而位移到近 9,000 埃处。当存在磁场时，发射频率稍微向短波移动<sup>[17]</sup>。

**铟化合物:** 磷化铟 (InP)<sup>[18]</sup>和砷化铟 (InAs)<sup>[19]</sup>是两个在 77°K 和更低温度处达到激光运转的 III-V 族化合物。例如，InP 在 77°K 时的 9,100 埃处发生发射。InAs 光激光器的波长可以通过磁场调谐在 3.117 微米到 3.112 微米<sup>[20]</sup>范围内变动。铟化铟(InSb)<sup>[21]</sup>光激光器的 5.12 微米波长也受磁场影响，包括纵向磁场使得阈值显著下降。

**新泵浦技术:** 一种泵浦半导体光激光器的新的辐照技术已经成功地应用于 III-V 族材料: InSb<sup>[22]</sup>、InAs<sup>[22]</sup>、GaAs<sup>[24]</sup>和 GaSb(铟化镓)。在这一方法中，以高能电子束辐照激光晶



体来产生电子-孔穴对。这种技术大大地加宽了作激光运转用的半导体材料的范围。锌的硫属化合物(VI族元素)已被提出可能用作可见光区的激光材料<sup>[25]</sup>。

最近的工作<sup>[26]</sup>,发现 InSb 可能是由大体积注入等离子体而发射,不是从相当窄的结区发射。从光束的角扩散情况来推断 InSb 的发射面积比典型的 GaAs 的发射面积大一个数量级。这一点暗示着,半导体光激光器有发展前途的。

### 准二元 III-V族化合物

有些准二元 III-V族化合物的发射波长可以通过改变其组成来大幅度地调谐。这类典型化合物是  $Ga(As_x P_{1-x})$ , 其中  $x$  在 0 到 1 范围内变动。 $Ga(As_x P_{1-x})$  的禁带宽度较窄,并且随 As 和 P 的相对浓度的变化而连续地改变。假如通过实验能实现用光泵来激发上述材料,则会产生连续分布的宽角度发射。

适当地改变  $Ga(As_x P_{1-x})$  中 As 和 P 的浓度,从 6,400 埃到 8,400 埃<sup>[27]</sup>都能获得激光作用。 $(In_x Ga_{1-x})As$  也同样在 1.9°K 下,在 2.07 微米和 1.77 微米处获得激光作用<sup>[28]</sup>。这里波长的可能范围从 0.84 微米到 3.1 微米。对  $In(P_x As_{1-x})$  在 1.6 微米处也同样已获得激光作用,这里的  $x=0.49$ <sup>[29]</sup>。然而,自由载流子的吸收将妨碍  $x$  在整个范围内变化。

### IV-VI族化合物

最近,半导体光激光器的范围已扩展到 IV-VI 族化合物:在 12°K 下,运转的硒化铅(PbSe)<sup>[30]</sup>和碲化铅(PbTe)<sup>[31]</sup>这些材料是 *p*-型的;另外,准备以加热来注入过多的 PbSe 或 PbTe 中。这两种材料增加了半导体光激光器的品种,其发射波长扩大到红外的较长波长处: PbSe 在 0.85 微米和 PbTe 在 6.5 微米。

## 气体光激光器

在许多不同的气体组合中已获得几百种波长的激光振荡。许多气体激光材料的研究,只有在材料的激光运转时才能进行。即有关的光谱工作是在事后进行的。有时候观察到各种不规则跃迁的激光发射,实际上重要的、并早已成功地运转的纯气体和混合气体光激光器列于表 6。

表 6 气体激光材料的特性

材 料	脉冲或連續波	主 要 波 長 (微 米)
He, Ne	脉冲, 連續波	0.6328, 1.153, 3.391(也可在远紅外 58 微米处)
Ne	脉 冲	0.27 到 0.612 間若干条綫
Xe	脉冲, 連續波	0.4972 到 0.5971 間若干条綫
Kr	脉 冲	0.4603, 0.6271
Kr	脉 冲	0.4577 到 0.7933 間若干条綫
He, Xe	連 續 波	3.51
Ar	脉冲, 連續波	0.4579 到 0.5145 間若干条綫
Ar	脉冲, 連續波	其中 0.4880, 0.5145 最强
He, Hg	脉 冲	0.6149, 0.5677, 0.7346, 1.0583
N <sub>2</sub>	脉 冲	0.7568 和 1.2347 之間許多条綫
	脉 冲	0.3 和 0.4 之間許多条綫
CO	脉 冲	0.5591 和 0.6614 之間若干条綫
	脉 冲	0.4650

气体系统中第一个成功的光激光器是 He-Ne 气体光激光器<sup>[32]</sup>, 它是以激发的 He 和 Ne 原子的弹性碰撞, 在 Ne 原子中获得不同能级之间集居数反转。直接用电子激发的激光运转已经在所有惰性气体 Ne、Ar、Kr 和 Xe 中获得。加 He 到 Xe 中能够显著地增加波长 3.51 微米激光的增益。

用电子轰击激发单次电离氩或汞(附加有 He)可以获得激光发射。这些器件在可见光谱区, 特别在蓝绿区的运转有特殊的实用价值。

### 氮和一氧化碳激光器

这些气体同样用来作实用光激光器。以电子轰击来激发氮以产生红外辐射。它将在非常短的高压脉冲作用下在紫外区 3,000 埃到 4,000 埃之间给以激光输出。一氧化碳同样可以用电子轰击在可见区产生脉冲输出。

水蒸汽也已在远红外区获得激光运转, 已观察到的发射波长为 118 微米和 28 微米。这种激光发射最长只有几分钟, 大概因为 H<sub>2</sub>O 被分裂成氧和氢而进行再复合所致。

## 最近研究的发展

最近发展中最感兴趣的是所谓化学激光器。虽然它到目前为止还没有达到实用的阶段。其方法是从化学反应中释放能量使得其中的气体获得集居数反转, 例如, 分子的分裂或分解。在氯化氢中已观察到由于氯气的光分解而形成的振动-转动能量级的跃迁, 其激光振荡<sup>[33]</sup>的波长约为 3.8 微米。

CH<sub>3</sub>I 和 CF<sub>3</sub>I 的光分解也获得了激光作用, 这一发射由碘原子在靠近 1.3 微米<sup>[34]</sup>处的跃迁而得到。然而对点火的储能器的尺寸缩小的任何可能性都没实现。这些光激光器现在还都须要用电容器放电触发的闪光灯。

然而, 某些研究团体进行着一种小型点火系统的工作, 该系统用以触发反应同时完成了泵浦激发能的供给。这种系统之一为氧和乙炔的复合是用电火花来点火的。爆炸或着火的结果, 有希望在反应时产生集居数反转, 并且获得激光作用。

## 参 考 文 献

- [1] T. H. Maiman, *Physical Review*, 123, 1145 (1961).
- [2] Z. J. Kiss and R. C. Duncan, *Applied Physics Letters*, 5, 200 (1964).
- [3] B. H. Soffer and R. H. Hoskins, *Journal of Applied Physics*, 6, 200 (1965).
- [4] A. Yariv, S. P. S. Porto and K. Nassau, *Journal of Applied Physics*, 33, 2519 (1962).
- [5] R. Solomon and L. Mueller, *Applied Physics Letters*, 3, 135 (1963).
- [6] S. E. Hatch, W. F. Parsons and R. J. Weagley, *Applied Physics Letters*, 5, 153 (1964).
- [7] H. Samelson, A. Lempicki, C. Brecher and V. Brophy, *Applied Physics Letters*, 5, 173 (1964).
- [8] D. F. Nelson and W. S. Boyle, *Applied Optics*, 1, 181 (1962).
- [9] A. A. Ballman, S. P. S. Porto and A. Yariv, *Journal of Applied Physics*, 34, 3155 (1963).
- [10] V. Evtuhov and J. K. Neeland, *Applied Physics Letters*, 6, 75 (1965).
- [11] C. G. Young, *Applied Physics Letters*, 2, 151 (1963).

- [12] L. F. Johnson, G. D. Boyd, K. Nassau and R. R. Soden, *Physical Review*, **126**, 1406 (1962).
- [13] J. E. Geusic, H. M. Markos and L. G. Van Uitert, *Applied Physics Letters*, **4**, 182 (1964).
- [14] R. C. Duncan, *Journal of Applied Physics*, **36**, 874 (1965).
- [15] R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T. F. Soltys and R. D. Carlson, *Physical Review Letters*, **9**, 366 (1962).
- M. I. Nathan, W. P. Dumke, G. Burns, F. H. Dill, Jr. and G. Lasher, *Applied Physics Letters*, **1**, 62 (1962).
- T. M. Quist, R. H. Rediker, R. J. Keyes, W. E. Krag, B. Lax, H. L. McWhorter and H. J. Zeiger, *Applied Physics Letters*, **1**, 91 (1962).
- [16] W. P. Dumke, *Physical Review*, **127**, 1559 (1962).
- [17] F. L. Galeener, G. B. Wright, W. E. Krag, T. M. Quist and H. J. Zeiger, *Physical Review Letters*, **10**, 472 (1963).
- [18] K. Weiser and R. S. Levitt, *Applied Physics Letters*, **2**, 178 (1963).
- [19] I. Melngailis, *Applied Physics Letters*, **2**, 176 (1963).
- [20] I. Melngailis and R. H. Rediker, *Applied Physics Letters*, **2**, 202 (1963).
- [21] R. J. Phelan, Jr., A. R. Calawa, R. H. Rediker, R. J. Keyes and B. Lax, *Applied Physics Letters*, **3**, 143 (1963).
- [22] C. Benoit a la Guillaume and J. M. De Bever, Paris Symposium on Radiative Recombination in Semiconductors, 1964.
- [23] C. E. Hurwitz and R. J. Keyes, *Applied Physics Letters*, **5**, 139 (1964).
- [24] C. Benoit a la Guillaume and J. M. De Bever, *Compt. Rend.*, **259**, 2200 (1964).
- [25] R. H. Rediker, *Physics Today*, **18**, 42 (1965).
- [26] I. Melngailis, R. J. Phelan, Jr. and R. H. Rediker, *Applied Physics Letters*, **5**, 99 (1964).
- [27] N. Holonyak, Jr., S. F. Bevacqua, C. V. Bielan and S. J. Lubowski, *Applied Physics Letters*, **3**, 47 (1963).
- [28] I. Melngailis, A. J. Strauss and R. H. Rediker, *Proceedings of IEEE*, **51**, 1154 (1963).
- [29] F. B. Alexander, V. R. Bird, D. R. Carpenter, G. W. Manley, P. S. McDermott, J. R. Peloke, H. F. Quinn, R. J. Riley and L. R. Yetter, *Applied Physics Letters*, **4**, 13 (1963).
- [30] J. F. Butler, A. R. Calawa, R. J. Phelan, Jr., T. C. Harman, A. J. Strauss and R. H. Rediker. *Solid State Commun.*, **2**, 301 (1964).
- [31] J. F. Butler, A. R. Calawa, R. J. Phelan, Jr., T. C. Harman, A. J. Strauss and R. H. Rediker, *Applied Physics Letters*, **5**, 75 (1964).
- [32] A. Javan, W. R. Bennett and D. R. Herriot, *Physical Review Letters*, **6**, 106 (1961).
- [33] Z. J. Kasper and G. Pimentel, *Physical Review Letters*, **14**, 352 (1965).
- [34] J. Kasper and G. Pimentel, *Applied Physics Letters*, **5**, 231 (1964).

譯自 *Electron. Design*, 1965, **13**, №15, M29~M37 (李逸峰譯 沃新能校)