

综 合 评 述

微微秒脉冲激光器及其应用 (I)

序 言

最近, 激光模式同步技术进展极快, 在固体激光器方面, 用 Q 开关的红宝石、掺钕钇铝石榴石或玻璃激光器得到了脉冲宽度 0.1~1 毫微微秒量级、周期几百兆赫的规则激光振荡; 这种亚毫微微秒脉冲, 在最近一、二年间, 进一步向微微秒脉冲发展, 峰值输出达 1 千兆瓦的激光器也能较为容易地得到。本文就固体激光器的模式同步现象和微微秒脉冲的产生进行解说, 尽量作到易懂, 同时对其应用领域作一展望。

微微秒脉冲的产生方法

如同“气体激光器自同步现象”一文中所说明的那样, 由于气体激光器的振荡谱宽远狭于固体激光器和半导体激光器, 所以即使在模式同步的情况下, 其脉冲宽度充其量在 10^{-10} 秒量级。

与此相反, 由于红宝石、钕玻璃和钕铝石榴石等的振荡谱相当宽, 所以在适当的条件下能得到 10^{-12} 秒量级的脉冲宽度。

特别是由于玻璃激光器的振荡谱宽达 100~200 埃, 所以在模式同步的情况下, 能得到振荡宽度极狭的脉冲, 例如当共振腔的间隔是 1.5 米时, 共振模数将是 6×10^4 , 于是最小脉冲宽度可达 10^{-13} 秒的量级。

如同“有机染料激光器”一文中评述的那

样, 为了同时进行 Q 开关和模式同步, 对红宝石来说, 使用隐花青溶液, 对钕玻璃或钕铝石榴石来说, 使用伊斯特曼哥达克 9740 或 9860 等可饱和染料, 都可使之产生激光振荡。

但是, 在这种情况下, 为了消除后向散射, 使用时最好将激光棒的两端切成布儒斯特角。为了得到单脉冲振荡, 可适当调整染料浓度, 并调整激励输入及反射镜; 也可以使可饱和染料盒尽量薄, 提高染料浓度, 并使其安置成相对光轴为布儒斯特角, 安置的位置最好是尽量靠近另一块反射镜。

另外, 上述 Q 开关用的可饱和染料, 由于太阳光或闪光灯中含有的大量的紫外线的作用, 很容易劣化, 所以染料盒的窗口最好用玻璃滤光片等制成。

作者使用的染料盒厚 0.135 毫米, 在两端面的窗口上使用了电介质滤光片。

由于伊斯特曼哥达克 9740 或 9860 可饱和染料的弛豫时间分别是 25~35、6~9 微微秒, 所以要得到周期是 10^{11} 或 10^{12} 量级的脉冲振荡是非常方便的, 在与克尔盒、转镜或超声波盒共同使用以获得模式同步现象这方面, 它是现时最好的可饱和染料。

有关钕玻璃或钕铝石榴石的情况, 已在“有机染料激光器”一文中谈及, 这里仅就红宝石的情况加以说明。

用隐花青甲醇溶液得到模式同步现象很

早就已报导^[1]，此后，报导了用硝基苯溶液或乙醇溶液也较为简单地得到了模式同步现象^[2,3]。除去酞花青溶液外，隐花青丙酮溶液也是迄今为止最佳的染料溶液，其吸收谱线的峰值与红宝石激光振荡谱线(6943埃)几乎一致。

另外，隐花青甲醇溶液吸收谱线的峰值接近7060埃，和红宝石的振荡谱线偏离约120埃，从光谱的角度考虑，还不能说是太好的溶液。还有其还原时间，和粘性较低的丙酮溶液相比，也有很大的不足，这也是不能否认的。

除此之外，可以作为红宝石激光器用的可饱和染料，还有二花青A(dicyanine A)和有名的1,1'-二乙基-2,2'-碘代二氢花青(DDI—1,1'-diethyl-2,2'-dicarbocyanine iodide)；在前者中，二甲基亚砷(DMSO—dimethyl Sulfoxide)溶液被称为是最佳的，其吸收峰值是6770埃，和红宝石激光振荡谱线的偏离也有170埃。

通常用DDI的水溶液或甲醇溶液作为Q开关，吸收谱线的峰值分别是7030埃和7060埃，由此可知它比隐花青丙酮溶液差得多。况且考虑到其水溶液的寿命约是几个小时，它的实用性也就可想而知了。

表1 微微秒脉冲红宝石激光器用的可饱和染料和溶剂

	染料	溶剂	脉冲宽度(微微秒)	峰值功率(千瓦)
1	隐花青	丙酮	25	1
2	1,1'-二乙基-2,2'-碘代二氢花青	甲醇	4	5
		水	2~4	5
3	二花青	二甲基硫酸	50	~1

用这三种可饱和染料作Q开关时，红宝石激光的脉冲宽度和峰值功率的典型数据示于表1。但是，如果改变染料的浓度及激发

输入，那么输出功率可能有某种程度的提高；所以表中列举之值，只能作为大致的标准。

另外，非常有趣的是，也有报告表明，在使用被动Q开关的场合下，和钹玻璃激光器相比，红宝石激光器的反射镜(涂镀多层介质膜)更容易被破坏。

为此，有人提出在激光共振腔中插入伽利略型望远镜，扩大光束的半径，以避免反射镜的破坏^[4]。图1是Mack的模式同步红宝石激光器的共振腔，望远镜是由焦距50毫米的凸透镜和100毫米的凹透镜组成的，透镜的二面涂镀增透膜。

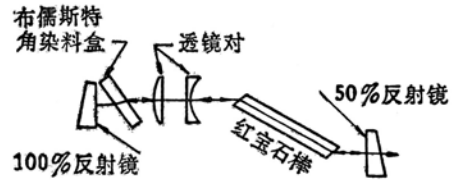


图1 模式同步红宝石激光器的共振腔。

根据Mack的看法，插入这种光学系统是为了补偿红宝石棒中产生的热透镜效应。关于这种热透镜效应，打算在另外的文章中进行解说，本文中就不再叙述了。

用焦距1米的照相机观察远场图样，调整透镜的间隔，使光束发散最小。

因此，由透镜的间隔和激光束的发散角，可以算出红宝石棒的热透镜的焦距。

这个焦距显然会随着激励输入的改变而有一定程度的变化，有报告表明，通常约为4米左右。另外，据说激光束的发散角低于1毫弧度。

Suelto等人利用屋脊棱镜的被动模式同步激光共振腔的示例示于图2^[5]。

使用这种共振腔时，具有如下特点：能简单地得到单一纵模振荡，重复性很好，与激光媒质的不均匀性也无多大关系，可以免

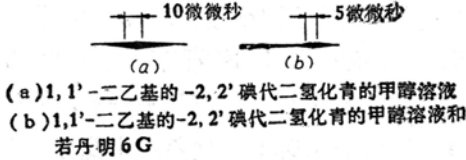
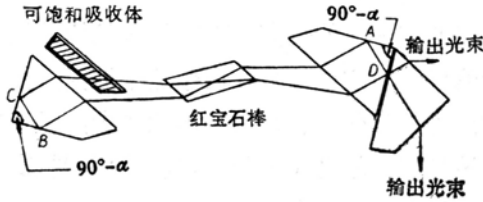


图2 利用屋脊棱镜的红宝石激光共振腔及其脉冲宽度。

除フリアス脉冲, 即使对于相当强的功率也不会引起反射镜的破坏。

棱镜顶角可取 $89^{\circ}56'$ 和 $89^{\circ}52'$, 如将共振腔长控制在 1.5 米和 2 米, 那么用隐花青的丙酮溶液可得到 20 微微秒, 用 DDI 的甲醇溶液可得到 10 微微秒这样的极窄脉冲。

有报告表明, 在 1, 1'-二乙基-2, 2' 碘代二氢化青中添加少量的若丹明 6G 溶液时, 这个脉冲宽度将变为 5 微微秒。

但是, 据说若丹明浓度超过某一规定量时, 模式同步将难于引起; 其原因认为是由于激光被若丹明 6G 吸收, 由此引起的媒质的局部温度变化产生了热透镜效应, 致使在可饱和和染料溶液中发生对流现象。

这种微微秒脉冲, 除了用上述的可饱和染料溶液外, 用贝克曼威特利的 440 型薄膜 Q 开关元件也能观察到^[6]。

将这些实验报告汇总一下, 就会发现, 用弛豫时间较长的可饱和染料进行 Q 开关时, 激光振荡的谱宽变得相当窄; 而使用弛豫时间短的可饱和染料进行 Q 开关时, 谱宽变得相当宽。

因而, 可以想象, 在应用这种微微秒脉冲时, 应按照它的情况, 适当选择可饱和染

料溶液, 这样可以得到更好的结果。

为了参考起见, 在图 3 和图 4 中给出了玻璃激光器模式同步用共振腔的示例。

图 5 给出了用伊斯特曼哥特克 9,740 可饱和染料使光谱扩展时的谱线发散情况。

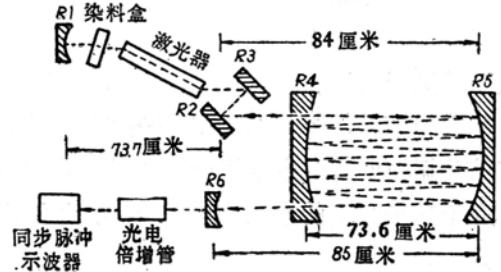


图3 玻璃激光器共振腔的示例。

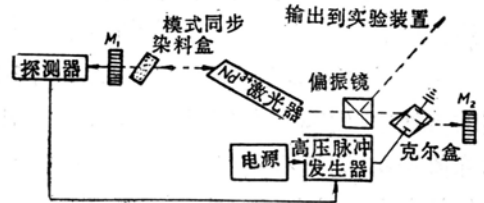


图4 单模式同步脉冲激光共振腔。

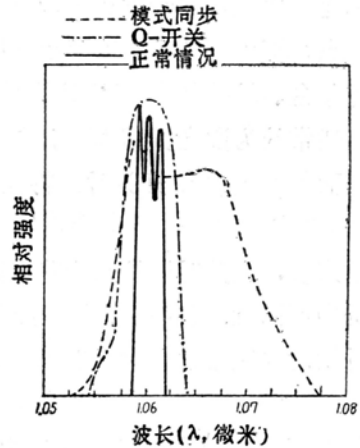


图5 玻璃激光器振荡谱线的特性。

为了便于比较, 图中列举了三种振荡情况, 即切成布儒斯特角的钕玻璃激光器的正常振荡、用克尔盒作 Q 开关的巨脉冲振荡和模式同步振荡。

由比较可知,用克尔盒作 Q 开关时的特点是,振荡谱线比较均匀,振荡光的脉冲宽度大致是 50 埃左右。与此相反,发现利用可饱和染料,将染料盒相对光轴安置成布儒斯特角,同时进行 Q 开关和模式同步时的谱线宽度将加宽到 180 埃左右,约为上述的 3 倍。

激光振荡谱宽加宽的原因是,由于使用可饱和染料,于是在法布里-珀罗共振系统的共振模的旁侧生成了一种边带,这种边带介于激光媒质的谱宽之间,均匀地分布着。

因而,在这种情况下最小脉冲宽度可达 2×10^{-13} 秒, 10^{10} 瓦量级的最大输出也能简单地得到。

在同时进行 Q 开关和模式同步时所得到的谱线中,发现在 1.06 微米(对应于 Nd^{3+} 的峰值振荡)附近有强度较大的谱线;这种锐线的产生,是由于被动 Q 开关激光器的振荡模的上升时间,和诸如克尔盒 Q 开关激光器相比,比较慢的缘故。

这一点也可以定性地予以说明,即一般认为用克尔盒、转镜作 Q 开关时的脉冲上升时间,通常约为激光振荡周期的 10~40 倍左右;而使用被动 Q 开关时,将是 100~1,000 倍左右。

反过来说,上升时间长意味着在激光振荡谱线的中心附近,仅存在着 2~3 个轴模;所以这种情况对应于跳动大,但光学相干性好。

另外发现, Q 开关和模式同步同时操作时的振荡谱线,在谱线中心近旁是非对称分布的。

还发现在模式同步的情况下,激光振荡谱线向长波长侧延伸。

这大概是由于激光振荡谱线的峰值,和

伊斯特曼哥达克 9740 可饱和染料的吸收带的峰值有一定的偏离,而和长波长侧的倾斜曲线段相对应的缘故。由于这个原因,使吸收激光的比例,在长波长侧比较少,所以在长波长侧,较之短波长侧,将能得到较高的振荡增益。

此外,在使用新近发表的伊斯特曼哥达克 9860 可饱和染料的情况下,激光振荡谱线的峰值和吸收带的峰值几乎一致,在这种场合,就没有出现上述现象,由此亦可确认上述解释。(伊斯特曼哥达克 9740 和 9860 的吸收带的峰值分别是 1.045 微米和 1.051 微米,见图 6)。

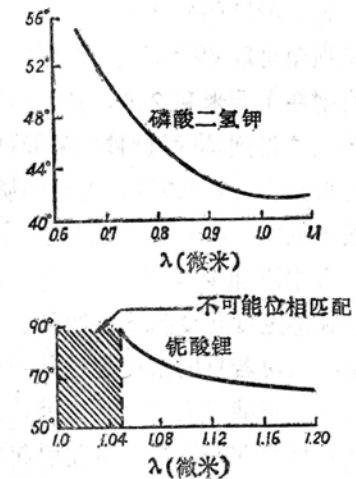


图 6 磷酸二氢钾和铌酸锂的二次谐波与位相匹配角的依赖关系。

微微秒脉冲激光器的应用

有关微微秒脉冲激光振荡的理论、实验报告很多,主要阐述了可饱和染料 Q 开关和模式同步作用的微微秒脉冲红宝石激光器、钇铝石榴石和玻璃激光器。这里归纳一下迄今报导的微微秒脉冲激光器的应用。

(1) 荧光寿命的测定

荧光线是可见光时的寿命很早就测定,早在十九世纪三十年代就能测定 1 毫微

秒量级的荧光寿命；但是由于测试仪器复杂，所以它也只能间接地进行测量。因而荧光寿命较短的观察例子的报导屈指可数。

在这一点上，用峰值输出极高、振荡时间几微微秒的模式同步脉冲激光激发荧光体，以进行寿命测量的方法，可以说是最好的一种方法。

为了测量荧光线的衰减时间，需要象氙灯那样的脉冲宽度极窄、输出高的激发光源，同时还需要带宽宽、响应时间极短的光探测装置。

通常认为测量吸收带处在4,000埃到10,000埃附近、吸收带宽频宽或振子强度是 10^{-3} —1量级的物质的荧光寿命，用模式同步的红宝石激光及其二次谐波或掺钕钇铝石榴石、玻璃激光及其二次谐波(图7)、 CF_3I 的二次谐波激发乃是最好的方法。

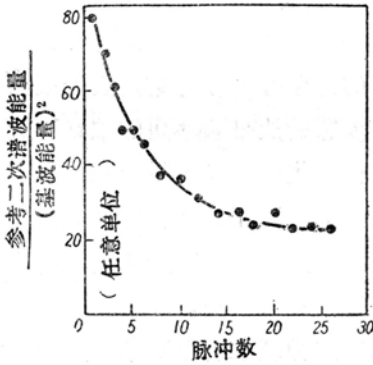


图7 Nd^{3+} 模式同步玻璃激光二次谐波的变换效率。

用连续振荡的模式同步钇铝石榴石激光器作激发光源，使用交叉场光电倍增管和取样示波器，也成功地使整个探测系统的上升时间变成60微微秒。可以想象这已经不是那么困难的方法，因为考虑到用Q开关激光器和行波型示波器相配合，已能对毫微秒量级的荧光寿命进行测定。

实际测试时，首先选择和试料的吸收带

相匹配的激光，用模式同步的微微秒脉冲激光激发稀薄的试料染料溶液时，光轴方向的分子就从基态感应跃迁到激发状态，其后，插入具有某一任意延迟时间的探测光，以研究试料在激发状态下的衰减特性。

另外，相对探测光(也可以使用连续振荡型的气体激光)而言，稀薄的试料染料溶液的透射率和处在基态的染料分子数成比例，所以当分子处于激发状态时，探测光的透射率急剧增加，于是如果适当控制探测光的插入时间，那么根据透射率随时间的变化，便能求得试料的寿命。

这样，如同在《有机染料激光器》一文中已经叙述的那样，Mack用红宝石激光束及其二次谐波，激发各种有机染料的稀薄溶液，测量了寿命，它们的值例举在表2。

表2 有机染料的寿命

染料	溶剂	荧光线	寿命
吖啶红	乙醇	5,800	2.4
吖啶黄	乙醇	5,050	5.2
钠荧光素	乙醇	5,270	6.8
若丹明 6G	乙醇	5,550	5.5
若丹明 6G	水	5,550	5.5
吖啶酮	乙醇	4,370	11.5
葱	甲醇	4,000	4.5

实验装置极其简单，对于表2的染料溶液，直接照射红宝石激光的二次谐波；对表3的试料，则用红宝石激光(6943埃)作激发光照射之。

整个测量装置的响应时间是0.45毫微秒，由此可见这是一种相当优异的测试方法。

测试试料的衰减时间时，是用我们通常的方法，即描下示波器层上的荧光曲线，观察其衰减特性。

表 3 红宝石用的 Q 开关染料的寿命

染料	溶剂	吸收线	荧光线	寿命
氯-铝酞花青	乙醇	6,700	7,550	10.1
氯-铝酞花青	甲醇	6,710	7,550	10.3
氯-铝酞花青	氯萘	6,970	7,380	8.0
氧钒酞花青	硝基苯	6,980	—	4.1
氧钒酞花青	氯萘	7,010	—	4.2
隐花青	甲醇	7,060	7,400	0.5

若丹明 6G 的详细跃迁机构和寿命问题有关, 将另文叙述, 这里要指出的是, 这种媒质被广泛用作微微秒脉冲探测用的双光子吸收的基质(图 8), 如同已经介绍的那样, 用掺钕钇铝石榴石或玻璃激光的二次谐波激发时, 在 5,900 埃附近将产生模式同步的激光振荡。

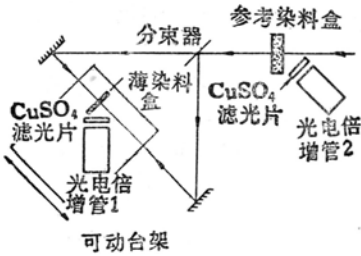


图 8 用双光子吸收观察微微秒激光脉冲的装置。

另外, 与寿命测量无直接关系的利用微微秒脉冲产生的感应喇曼散射的研究也进行得相当活跃。

感应喇曼散射的情况下, 半经典地求出的理论值和实验值的差值大, 可以证明后者较前者约大二个数量级。

这被认为是由于入射激发光受到了媒质的克尔效应, 发生了自聚焦现象。如果假定分子由交流电场驱动, 那么根据半经典公式, 克尔效应的响应时间可由德拜旋转时间 T 确定。这个旋转时间可用下式表示

$$T = 4\pi a^3 \eta / 3kT$$

其中 η 表示媒质的粘性, T 表示温度, a 表

示分子的有效半径, k 表示波耳兹曼常数。

通常这个 T 值是 $10^{-11} \sim 10^{-12}$ 秒, 所以当脉冲宽度大于 T 值的激光束入射时, 各向异性分子和这个入射脉冲响应, 开始作旋转运动, 但是脉冲宽度远短于 T 的模式同步激光束入射时, 分子并不响应于入射光, 于是不发生平动, 因而激光束自聚焦的阈值变得相当高。

实验也表明, 当用微微秒脉冲激光激发时, 上述情况也被喇曼现象的减少所证实。

另外, 用脉冲宽度 5 微微秒的红宝石激光激发时, 对二硫化碳、甲苯、溴苯分子的“同步”现象所引起的自聚焦现象, 也进行了实验和理论的研究, 本文就不谈了。

(2) 用可饱和吸收体进行光放大

具有一个或二个边带的激发光(激光束)射入可饱和吸收体时, 被这种吸收体吸收的激发光的比例, 因入射光的频率而异, 所以可望振子强度会有些变化。另外, 当可饱和吸收体的还原时间较之激发激光束的中心频率和伴随它的边带频率间的拍频小时, 由于被吸收体吸收的激发入射激光束的吸收量是非线性的, 所以离开吸收体后的激光束的频率是不同的, 于是大部分激发入射激光束的能量将移向边带一侧。

利用这种现象进行毫米波放大的实验也有所报导。另外, Mack⁽⁴⁾将亮度极高的模式锁定的 Q 开关红宝石脉冲激光射入可饱和染料溶液时, 也发现了与这个 Q 开关激光束同时入射的微弱光得到了放大。

可饱和染料溶液的长度为 1 厘米时, 获得的能量增益约为 20 倍左右。

其后, 关于可饱和吸收体的烧孔现象, 也发表了相当详细的理论研究, 并和实验研究相结合, 阐明了在可饱和吸收体中, 和亮度高的光相比, 弱光的吸收量急剧减小, 即

发生了吸收谱线中的空穴正好迁移到吸收零点这样的现象。这种情况下，由于吸收谱线中存在的空穴被负吸收带摆动耗散，所以亮度弱的波束的放大包含了可饱和吸收现象引起的增益和感应热散射现象引起的增益。

在喹啉、丙酮的碘溶液，硫酸铜的甲醇溶液，硫酸铜的水溶液或玻璃中也观察到了感应热散射现象，其详细情况另文叙述，本文不再谈及。图 9 用以说明在可饱和吸收体中的光放大现象。

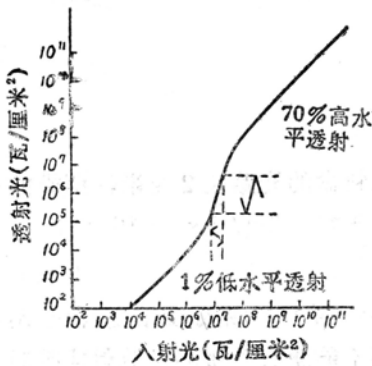


图 9 可饱和吸收体光学增益的说明图。

考虑频率、振幅都略有不同的二个波束，当它们同时射入可饱和吸收体时，在吸收体中激起这二个波束频率间的拍频振幅调制；由于激发激光束的强度很强，所以可饱和吸收体的染料分子受到它的影响，使透射率发生变化；假设吸收体本身的弛豫时间相当短，且包含于这种调制频率之中移动，那么如图 9 所示，就能明白由于受到非线性透射率的

影响，使调制度加强或者减弱。特别是明白了当调制度弱时，将激起边带；当调制度强时，和入射激光束的强度相比，整个输出射束的强度是小的，但边带强度急剧增加。

(3) 等离子体的产生

用透镜聚焦高功率 Q 开关激光，并照射气体或固体，会产生亮度很高的高温等离子体，乃是早已作过的事。这对于运用微微秒脉冲激光激起高温气体反应，并研究辐射场和物质的相互作用，是一种非常有效的手段。

用通常的 Q 开关激光也能适当地调整等离子体密度、离化状态和等离子体温度等，可望今后会有这方面的实验研究。

另外，激光击穿气体时伴随出现的等离子体的电子密度也达到了 10^{19} 厘米⁻³，激起了 1,000 电子伏左右的高温。

把激光束照射到固体粒子单体时，观察到了球对称扩散的等离子体球，研究它和磁场的依赖关系也是很有趣的。

如同 Basov 等人的 5 级放大的钨玻璃激光器一样，已能得到脉冲宽度 10 微微秒，峰值输出 10^{12} 瓦的激光，可以想象这除了今后用来研究热中子散射现象之外，还可用来阐明诸如等离子体中的朗道能级。

参考资料(略)

取自 加藤渊, <电子科学>, 1970, 20, №2, 86~91

微微秒脉冲激光器及其应用 (II)

序 言

关于利用可饱和染料作 Q 开关的固体激光器的被动模式同步现象作为《微微秒脉冲激光器及其应用》已作了详细的解说，本

文继续前文进一步阐明有关微微秒脉冲激光器的应用。

但是，本文与前文有些不同，列举了一些还刚开始的最新研究领域，由于今后研究情况的变化，或许甚至会有完全不同的解译，