

高 峰 值 功 率 重 频 脉 冲 固 体 激 光 器

曹 三 松 王 明 秋 韩 凯
(西南技术物理研究所, 成都, 610041)

摘要: 综述了高 峰 值 功 率 重 频 脉 冲 固 体 激 光 器 的 发 展 现 状, 对 其 中 的 Q 开 关、腔 倒 空、锁 模 等 窄 脉 冲 技 术 和 放 大 技 术 进 行 了 分 析, 展 示 了 高 峰 值 功 率 重 频 脉 冲 固 体 激 光 器 的 发 展 前 景。

关键词: 高 峰 值 功 率 重 频 脉 冲 固 体 激 光 器

High-peak power repetition rate pulsed solid-state lasers

Cao Sansong, Wang Mingqiu, Han Kai
(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, 610041)

Abstract: The status of high-peak power, repetition rate pulsed solid-state lasers are reviewed. The short-pulse solid-state laser technology (such as Q-switch, cavity-dumping, mode-locking) and the pulse amplification are evaluated. The development of high-peak power, repetition rate pulsed solid-state lasers will be highlighted in future.

Key words: high-peak power repetition rate pulse solid-state laser

一、引 言

普通固体脉冲激光器输出的光脉冲其脉宽持续几百微秒甚至几毫秒,其峰值功率也只能达到几十千瓦的水平,远远不能满足某些应用的要求。例如,激光测距的测程是随激光峰值功率的大小而增加的,所以压缩激光脉冲宽度,增加激光输出峰值功率一直是激光技术研究的重要课题。通过多年的研究工作,国内外已研制出各种类型的高峰值功率固体激光器。由于有了高 峰 值 功 率 激 光 束,当 它 与 物 质 相 互 作 用 时,就 产 生 了 一 系 列 具 有 重 大 意 义 的 新 现 象、新 技 术 和 新 方 法,为 等 离 子 体 物 理、激 光 加 工、非 线 性 光 学 和 光 电 对 抗 技 术 提 供 强 光 光 源,并 促 进 了 激 光 热 核 反 应、激 光 测 距 和 高 速 环 境 参 数 探 测 等 技 术 的 发 展。本 文 综 述 的 高 峰 值 功 率 固 体 激 光 主 要 是 指 激 光 脉 冲 重 复 频 率 10~100Hz,激 光 峰 值 功 率 为 100~1000MW 范 围 的 一 类 固 体 激 光 器,这 种 类 型 的 激 光 器 通 常 是 综 合 激 光 脉 冲 压 缩 技 术 和 激 光 放 大 技 术 而 构 成。激 光 脉 冲 压 缩 技 术 是 通 过 调 Q 方 式 或 锁 模 方 式 将 激 光 脉 冲 能 量 压 缩 在 宽 度 极 窄 的 脉 冲 中 发 射,从 而 使 激 光 脉 冲 的 峰 值 功 率 大 幅 度 提 高;激 光 放 大 技 术 则 是 通 过 迭 加 放 大 的 方 法 使 固 体 激 光 器 输 出 能 量 和 峰 值 功 率 与 放 大 器 的 级 数 成 比 例 地 增 加,因 此,高 峰 值 功 率 重 频 脉 冲 固 体 激 光 器 通 常 是 一 种 振 荡 器-放 大 器 结 构,主 要 由 振 荡 器 决 定 激 光 输 出 的 脉 冲 宽 度、光 束 质 量 和 谱 线 宽 度 等 指 标,而 由 放 大 器 决 定 其 脉 冲 能 量 和 功 率 的 大 小,通 过 激 光 振 荡 器 和 放 大 器 的 优 化 设 计,既 可 以 得 到 优 异 的 激 光 光 束 质 量,又 能 够 大 大 提 高 输 出 激 光 束 的 能 量 和 峰 值 功 率。本 文 将 根 据 国 内 外 高 峰 值 功 率 重 频 脉 冲 固 体 激 光 器 的 现 状,对 所 涉 及 的 固 体 激 光 材 料、固 体 激 光 器 窄 脉 冲 技 术 和 放 大 技 术 进 行 综 合 评 述,着 重 对 有 关 的 理 论、技 术 特 点 进 行 分 析,其 技 术 细 节 可 从 本 文 所 列 参 考 文 献 中 得 到。

二、高峰值功率固体激光材料

近年来,国内外固体激光材料的研究工作十分活跃,目前能够制备的固体激光材料主要是稀土离子晶体(或玻璃)、过渡金属离子晶体和色心晶体等,绝大多数稀土离子激光材料和少数过渡金属离子激光晶体只发射固定频率激光,而色心晶体和一部分过渡金属离子晶体可发射可调谐激光。表 1 列出了主要几种可应用于高峰值功率固体激光器的稀土离子固体激光材料^[1]。一般来说,高峰值功率固体激光器要求材料具有以下几点:(1) 阈值低,效率高,满足实际应用对固体激光器重量和体积的要求;(2) 高贮能,即荧光寿命长,饱和能量密度高;(3) 热物理性能好,能够在高重复频率条件下稳定工作;(4) 光学性能好,尺寸大。从表 1 所列数据可知,双掺 Nd:Cr:GSGG 晶体具有较高的激光效率,但热性能差,高重频运转下输出光束质量低。钕玻璃和 Ho: Tm: Cr: YSGG 晶体储能高,输出人眼安全波长,但阈值高,效率低。钕玻璃是一种性能优异的高峰值功率固体激光材料,但因热性能差,只适合于单次或低重频脉冲运转。Nd: YAG 和 Nd: YLF 晶体的热导率高,热膨胀系数小,适合于高重复频率工作,且激光效率高,阈值低,相比之下, Nd: YLF 晶体比 Nd: YAG 晶体更适合于高重频高峰值功率运转,它具有自然双折射,可以减轻热致双折射效应对激光性能的影响。但 Nd: YLF 晶体生长工艺复杂,且机械强度低,在高平均功率下易断裂。所以目前高重频高峰值功率固体激光器主要选择综合性能指标好的激光材料——Nd: YAG 晶体。

表 1 几种稀土离子固体激光材料特性

	Nd: YAG	Nd: YLF	Nd: Cr: GSGG	Nd glass	Er: Yb glass	Ho: Tm: Cr: YSGG
化学式	$\text{Nd}^{3+}: \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	$\text{Nd}^{3+}: \text{LiYF}_4$	$\text{Nd}^{3+}, \text{Cr}^{3+}: \text{Gd}_2\text{S}_3\text{Gd}_3\text{O}_2$	LG760	QE-7	$\text{Ho}^{3+}: \text{Tm}^{3+}: \text{Cr}^{3+}: \text{Y}_3\text{Sc}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$
结构类型	立方	正方	立方	各向同性	各向同性	立方
波长 (nm)	1064	1053(1)	1061	1054	1535	2088
线宽(cm^{-1})	4.5	12(4)	~ 24	~ 175	~ 100	~ 50
荧光寿命(μs)	230	520	~ 250	330	8000	8500
饱和能量(J/cm^2)	0.62	0.73	0.45	4.4	7.2	10.6

表 2 几种过渡金属离子固体激光器性能

	红宝石	金绿宝石	钛宝石	Co: MgF
化学式	$\text{Cr}^{3+}: \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Cr}^{3+}: \text{BeAl}_2\text{O}_4$	$\text{Ti}^{3+}: \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Co}^{2+}: \text{MgF}_2$
晶体类型	三角	正交	三角	立方
中心波长 (nm)	694.3	750	800	1950
调谐范围 (nm)		701~ 818	660~ 1060	1500~ 2300
线宽(cm^{-1})	11	1500	3230	2100
荧光寿命(μs)	3000	262	3.1	1300
跃迁截面(cm^2)	2.5×10^{-20}	2×10^{-20}	2.7×10^{-19}	1.5×10^{-21}
饱和能量(J/cm^2)	11.4	13	0.92	68

表 2 列出了可应用于高峰值功率固体激光器的过渡金属激光固体材料^[1],其中除红宝石晶体外,另外几种晶体都是可调谐激光晶体材料。这是一类重要的可调谐高峰值功率固体激光材料,应用非常广泛。色心晶体也是一类近红

外波长可调谐激光材料,用这类激光晶体构成的锁模连续固体激光器,已实现微微秒和飞秒窄脉冲激光输出,具有很大的应用潜力^[2]。

三、脉冲压缩技术

固体激光器通常是以脉冲泵浦或连续泵浦形式工作,在脉冲泵浦自由振荡运转方式下,激光脉冲的持续时间与泵浦灯闪光时间相近或略短一点,通过改变电源放电回路电感或电容可以改变闪光灯脉宽,例如增大电容,可将 Nd:YAG 激光器的激光脉宽由数百微秒增加到数毫秒,因此自由振荡脉冲 Nd:YAG 固体激光器的脉宽一般为 $100\mu\text{s}\sim 10\text{ms}$ 。在自由振荡运转方式下,激光振荡所形成的光脉冲并不是单一平滑的,而是由宽度只有微秒量级的强度不等的小尖峰脉冲串所组成,又称为弛豫振荡,泵浦脉冲能量的增加只会使小尖峰脉冲的个数增加,脉冲宽度拉长,也就是说输出的光脉冲能量会有所增加,但激光峰值功率不会明显增加。激光的峰值功率一般在 $\sim 10^5\text{W}$ 范围。自由振荡的固体激光器由于存在弛豫振荡,阻碍了激光脉冲峰值功率的提高,因此,人们提出用调 Q、腔倒空和锁模等技术方法,压缩激光脉冲宽度。

1. 调 Q 运转

调 Q 运转就是在激光谐振腔中,加入调制元件,通过谐振腔 Q 值的改变,抑制弛豫振荡,即在脉冲光泵开始后的相当一段时间内,使谐振腔处于高 Q 值状态,激光振荡不能形成,而晶体粒子反转数得到尽可能大的积累,当积累达到最大程度时突然降低 Q 值,激光就会在非常短的时间内输出,由于激光脉宽很窄,激光峰值功率很高。实现 Q 突变的方法很多^[3],电光 Q 开关和声光 Q 开关是其中最主要的两种,电光 Q 开关具有开关时间短,可关断高能量激光脉冲等特点,主要适用于大能量脉冲激光器,而声光 Q 开关具有插入损耗小,所需调制电压低,重复频率高,脉冲幅度稳定等特点,因此特别适用于低增益的连续固体激光器。典型的电光 Q 开关 Nd:YAG 激光器脉宽 10ns 左右,输出能量 $0.05\sim 0.5\text{J}$,峰值功率达数十兆瓦,重复频率 $10\sim 50\text{Hz}$ 。采用场效应管和微波管改进电光 Q 开关的驱动电源,可将调 Q 脉冲激光的重复频率提高到 kHz 范围,国外已有指标为重频 1kHz ,脉宽 9ns ,TEM₀₀输出能量 100mJ 的 Nd:YAG 激光器产品出售^[4]。

理论和实验研究表明,调 Q 固体激光器的峰值功率高低、脉冲宽度的大小主要取决于初始反转粒子数,所以提高泵浦速率和泵浦均匀性、降低腔内损耗、缩短腔长是实现激光器高功率输出的关键。研究还发现,调 Q 固体激光器中初始反转粒子数的积累受限于两种过程,一种是由各种反馈途径形成的振荡(自振),一种是对自发辐射的放大效应(超辐射),这两种过程使得反转粒子数有一个上限,因而在高能量泵浦下调 Q 激光器输出将出现饱和。消除自振,减小超辐射效应,是调 Q 激光器设计和研制所必须注意的问题。由于有一部分反转粒子被消耗在荧光和自发辐射方面,因此调 Q 脉冲激光器的能量效率要低于自由振荡脉冲激光器。

2. 腔倒空

调 Q 固体激光器一般都采用损耗突变的工作方式,在这种工作方式下,腔内 Q 值由低变高后,腔内才开始有激光振荡产生,激光工作物质内部所积累的反转粒子数开始转变为谐振腔的光能。这种调 Q 方式是先振荡,后输出,由于光波在谐振腔内有一个建立过程,必须往返传播数十次后,光脉冲才能达到最大值,导致输出激光脉冲的宽度较大。例如电光 Q 开关由于受到脉冲建立时间的限制,其输出最小脉宽约为 10ns 左右。腔倒空是一种增益突变 Q 开关技术,其特点是谐振腔由两块全反射镜构成,在 Q 开关打开前,因腔内 Q 值很高,激光在腔内已经形成振荡,从而将初始反转粒子转变成谐振腔内的光能;当 Q 开关打开后,腔内光能就通过特定的光路耦合输出。腔倒空的特点是谐振腔的 Q 值由高变低,腔内激光振荡和输出同时

进行, 激光输出不再等待光脉冲的建立时间, 激光脉宽约为光子在腔内渡越一次所需要时间, 即 $t = 2L/c$, L 是腔长, c 是光速。因此腔倒空技术所获得脉冲宽度比损耗突变 Q 开关激光器窄。实现腔倒空的主要技术方法有电光腔倒空, 声光腔倒空和机械式腔倒空(又称为受抑全内反射 Q 开关)等几种形式^[5]。国内实验研究证明电光腔倒空技术可得到比普通调 Q 脉冲激光器脉宽窄的激光输出^[6]; 采用连续泵浦声光腔倒空技术, 可使固体激光器输出脉冲重复频率达到数兆赫兹, 脉宽很窄^[7], 采用机械式腔倒空方法, Nd:YAG 脉冲激光器输出脉宽为 13~15ns, 激光效率很高, 可达 1.5%^[8]。

由于大多数过渡金属离子激光材料荧光寿命短, 已不能采用上述的损耗突变技术实现高峰值功率输出, 而是通过 10ns 量级的窄脉冲泵浦, 获得极高的增益而产生巨脉冲, 因此实际情况是一种增益突变 Q 开关, 增益开关的激光脉宽取决于泵浦能量水平和腔长, 并与腔损耗成反比, 而与泵浦脉宽和波形无关, 采用增益开关运转方式, 掺钛蓝宝石固体激光器在 10ns 脉宽的 Nd:YAG 激光器泵浦下, 激光脉宽仅为 4ns^[9]。

3. 锁模运转

采用腔倒空技术压缩激光脉冲宽度在原理上是有限度, 这是因为要求激光器有一定的输出功率, 激光材料不能太短, 因此谐振腔有一定长度, 限制了激光脉宽进一步压缩。锁模技术是一种能将激光脉冲宽度压缩到皮秒(10^{-12}), 甚至飞秒(10^{-15})量级的新方法。锁模运转, 就是在谐振腔中加入调制器, 使激光中不同振荡纵模之间有固定的位

表 3 Nd:YAG 激光器输出脉冲时间特性及脉宽压缩方法

泵浦方式	运转方式	重复频率	脉冲宽度
脉冲	自由振荡	0~500Hz	0.1~10ms
脉冲	Q 开关	0~500Hz	3~30ns
脉冲	腔倒空	0~200Hz	1~3ns
脉冲	锁模 (脉冲序列)	0~200Hz	30~200pps
连续	Q 开关	0~100kHz	100~700ns
连续	腔倒空	0.5~5MHz	15~50ns
连续	锁模	100~500MHz	30~200pps
连续	Q 开关加锁模 (脉冲序列)	0~200Hz	30~200pps

相关系和相等的频率间隔, 它们迭加会产生加强干涉, 相位逐步锁定, 形成越来越窄的时间包络, 并使能量逐步迭加到时间包络上, 获得高峰值功率的超短脉冲激光。目前实现锁模方法有主动锁模、被动锁模、同步锁模和碰撞锁模, 国内有的研究单位曾采用主被动锁模方法构成 Nd:YAG 超短脉冲激光系统进行人造测距, 通过两级固体激光放大器将锁模单脉冲能量放大到 100mJ, 脉宽 120pps, 重复频率 1~10Hz^[10]。锁模技术比较复杂, 对器件结构稳定性要求很高, 因此锁模固体激光器目前主要在室内环境下应用。表 3 列出了典型的 Nd:YAG 激光器输出脉冲的时间特性及采用的脉宽压缩方法^[11]。

四、激光放大技术

调 Q 或锁模技术可以获得脉宽很窄、峰值功率很高的激光输出, 但当固体激光器运转在调 Q 或锁模状态时, 激光工作物质的体积不能太大, 否则容易自激, 这就限制了激光输出能量或峰值功率的增加。只有通过激光放大技术提高窄脉冲激光能量, 从而提高激光器输出的峰值功率。

图 1 是典型的高峰值功率重复频率脉冲 Nd:YAG 激光器的示意图, 它由注入种子脉冲单元、

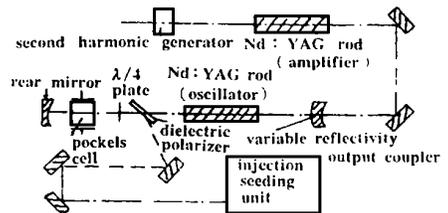


Fig. 1 A typical pulsed Nd:YAG laser layout

激光振荡器单元和激光放大器等单元组成,其中的非线性晶体是将 $1.06\mu\text{m}$ 基波输出转换为二次谐波输出。

描述激光放大过程的最基本方程是 Frantz-Nodvik 方程,考虑一个光脉冲单次通过一个反转贮能的放大器,放大器的输出能量 E 满足如下的微分方程^[12]:

$$dE(x)/dx = E_{st}\{1 - \exp[-E(x)/E_s]\} - \alpha E(x) \quad (1)$$

式中, E_{st} 为放大介质的贮能(J/cm^3), E_s 称为饱和能量密度,它是描述放大过程的关键参数,其中 α 是介质的损耗系数。对优质 YAG 晶体,约为 0.01,其值很小且晶体长度短,因此可以用集中损耗近似方法求解非线性方程(1),最后得出激光放大器输出能量表达式:

$$E_{out} = E_s \exp(-\alpha L) \ln\{1 + [\exp(E_{in}/E_s) - 1] \exp(E_{st} \cdot L/E_s)\} \quad (2)$$

式中, E_{in} 是放大器的初始输入激光能量,即振荡级的输出能量, L 是激光介质 YAG 晶体的长度,如果取 $\alpha = 0.01/\text{cm}$,由(2)式进行计算得出的结果与用(1)式数值积分求解得出的结果相差很小,对工程设计而言是可以接受的。如果激光放大介质的损耗系数较大,尺寸较长,宜采用薄片损耗模型代替集中损耗近似进行计算^[13]。

增益是放大器最基本的参数,通常,放大器的增益表示为 $G = 10 \log(E_{out}/E_{in})$,但为了工程计算方便采用放大倍数表示增益:

$$A = E_{out}/E_{in} = (E_s/E_{in}) \exp(\alpha L) \ln\{1 + [\exp(E_{in}/E_s) - 1] \exp(E_{st} \cdot L/E_s)\} \quad (3)$$

由上式可知激光放大器的增益与放大器中激光工作物质的性能(E_s, α, L)和运转条件(E_{st}, E_{in})有关,这就是说,当放大激光工作物质确定以后,必须合理地选择器件工作条件,通过有效的光泵浦获得尽可能高的贮能,并选择合适的输入信号能量将放大器中的贮能提取出来,以达到最终要求的激光输出能量。由泵浦能量 E_p 转变为放大激光工作物质的贮能效率为:

$$\eta_l = E_{st}/E_p \quad (4)$$

它由激光电源效率、聚光腔效率及荧光效率等决定,对 Nd:YAG 激光放大器来说,贮能效率在 1% ~ 2% 左右。放大器的贮能转变为激光输出能量用提取效率表示:

$$\eta_e = (E_{out} - E_{in})/E_{st} \quad (5)$$

将(2)式代入上式,可得出提取效率与注入能量 E_{in} 的关系,图 2 就是由(5)式计算出的 Nd:YAG 激光放大器的提取效率与注入信号能量 E_{in} 的关系。由该图可知,如果放大器的输入能流密度小于饱和能流密度 E_s (称为小信号增益范围),则放大器增益是指数形式,在这种情况下,放大增益因子很高,但提取的能量相当

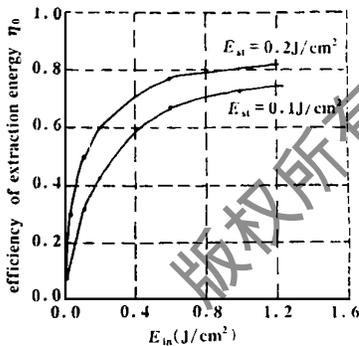


Fig. 2 Amplifier energy extraction as function of input energy density

低,因为粒子数反转饱和并没有发生。另一种极限情况是输入能流密度比饱和能流密度大得多,在这种情况下,提取的能量将趋于饱和,即贮存在放大器中的能量是简单地全部迭加在输入能量之上。一般来说,放大器运转的最好位置是在这两个极端之间,这时不仅有较高的放大倍率而且具有较高的能量提取率。我们采用电光调 Q 和放大技术,研制出高功率重频脉冲 Nd:YAG 激光器,达到的技术指标为:峰值功率 200MW,脉宽 10ns,重复频率可达 $20\text{Hz}^{[14]}$ 。

通过激光放大方式从重频脉冲固体激光器中提取大的激光能量,必须注意以下几个方面的问题,首先是放大器中激光介质的尺寸不能过大,否则容易形成寄生振荡和超辐射,减小放

大激光介质的贮能能力; 第二, 随着放大器激光脉冲峰值功率密度的增加, 电场强度会大到足以改变介质的折射率, 这将导致所谓的自聚焦现象, 即放大光束破坏激活介质, 而在其内部产生气泡和痕迹; 最后, 由于放大器端面和光学元件所镀增透膜有一定的损伤极限, 所以当功率密度过高会使膜层损伤。为了获得更高的能量, 可采用多通放大的设计方法, 与单通放大器相比, 多通放大器可以更有效地提取介质中的能量, 但结构复杂得多, 主要用于实验室。

五、结 语

在激光应用的推动下, 高峰值功率固体激光器正在向高光束质量、高平均功率、高重复频率和高效率方向发展, 因此在脉冲压缩和放大技术的基础上, 必须通过谐振腔设计, 如非稳腔、变反射率输出镜和相位共轭等技术提高激光输出的光束质量, 例如国外已成功应用相位共轭技术在高峰值功率重频脉冲 Nd: YAG 激光器中, 达到电光调 Q 输出激光能量 1J, 脉冲重频 100Hz, 光束质量 3.4 倍衍射极限^[15]。另外, 通过对激光工作物质进行热补偿, 如板条式固体激光器, 减小固体激光器在高功率运转下的热效应, 也是提高激光输出的脉冲重复频率和平均功率以及输出光束质量的技术途径之一。随着高功率二极管制作工艺的成熟和性能完善, 通过二极管泵浦技术, 实现高峰值功率固体激光器高效率、高重复频率运转, 无疑将是未来固体激光技术发展的方向。

参 考 文 献

- 1 Penzkofer A. Prog Quant Electron, 1988; 12(4): 339
- 2 Cheo P K. Handbook of solid-state lasers. New York: Marcel Dekker, 1989: 457
- 3 Svelto O. Principles of lasers, 3rd ed. New York: Plenum, 1989: 250
- 4 Penzkofer A. SPIE, 1990; 1277: 14~ 28
- 5 杨臣华, 梅遂生, 林钧挺. 激光与红外技术手册. 北京: 国防工业出版社, 1990: 659
- 6 王福贵, 张新国. 激光, 1980; 7(11): 41~ 43
- 7 刘敬海, 徐荣甫. 激光器件与技术. 北京: 北京理工大学出版社, 1995: 162
- 8 时顺森, 屈乾华, 杜又文. 兵器激光, 1982-6(6): 22~ 26
- 9 杨 扬, 刘宏发, 张国威. 激光技术, 1995; 19(4): 204~ 208
- 10 何慧娟, 李永春. 光学学报, 1986; 6(12): 1092~ 1097
- 11 Hecht J. The lasers guidebook. McGraw-Hill Book Company, 1986: 293
- 12 Koehnert W. Solid-state laser engineering. Berlin: Springer-Verlag, 1988: 129
- 13 张 彬, 吕百达. 中国激光, 1996, A23(2): 1061~ 1066
- 14 曹三松, 徐绍林, 王明秋 *et al.* 第十二届全国激光学术会议论文专辑, 武汉, 1996: 73
- 15 Karpukhin S N. SPIE, 1995; 2772: 170~ 176

作者简介: 曹三松, 男, 1959 年 7 月出生。副研究员。现从事激光器件与技术的研究工作。

收稿日期: 1997-03-17 收到修改稿日期: 1997-06-13

• 产品简讯 •

普 克 尔 盒

美国马萨诸塞州的 Spindler & Hoyer 公司推出一种普克尔盒可以用作金绿宝石、红宝石、Nd: YAG 和其它掺钕激光器等脉冲型固体激光器的调 Q 开关。该盒也可用于锁模脉冲序列的脉冲隔离或用于宽带辐射调制隔离。

中尧 马理 供稿