

高功率超短脉冲激光系统的进展*

孟 绍 贤

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 评述了超功率亚皮秒脉冲产生的物理基础. 峰值功率和照度的增加直接起因于啁啾脉冲放大技术. 考查了超短脉冲的产生、展宽、放大和压缩. 讨论了发展和设计太瓦-拍瓦激光的方案和一般问题.

关键词 自锁模, 群速度色散, 啁啾脉冲放大

1 引言

自从 1966 年 DeMaria 利用掺 Nd 玻璃进行激光的模式锁定获得超短光脉冲以来, 人们就注意到超短光脉冲应用的巨大潜力. 1968 年前苏联列别捷夫研究所首次建立超短脉冲激光系统, 进行激光核聚变实验. 但该装置存在两个问题, 这就是不能有效地提取能量和容易产生自聚焦, 使光束的空间质量变坏. 我们在 70 年代中期也建立了小型掺 Nd: 玻璃超短光脉冲激光系统, 并进行打金属靶以产生 X 光的实验, 但亦存在同样的问题.

1985 年首次提出啁啾(频率扫描)脉冲放大技术^[1]. 从锁模激光器出来的超短光脉冲不直接进入放大器, 而是先用透镜聚焦于光纤中, 由于强光下的自位相调制作用, 使脉冲的频谱加宽. 同时由于不同频率(或波长)的光在光纤中传播速度不同而形成群速度色散, 从而使脉冲加宽 $10^2 - 10^3$ 倍. 然后这个加宽的长脉冲再经过放大器放大. 这样即可减少非线性效应影响, 又可有效地提取能量. 最后将放大的脉冲经过具有负色散的光栅对压缩, 可以获得比振荡器输出更短的脉冲.

然而这种方法产生的脉冲输出稳定性不好, 譬如光纤容易被打坏, 并且信噪比较低. 1987 年 Martinez^[2] 建议采用具有正群速度色散系统来代替光纤. 它是在两反平行衍射光栅之间放置一个扩束望远镜. 这个系统可以加宽

脉冲, 但不能使光谱加宽. 因此要获得短脉冲, 完全由激光振荡器本身所决定. 掺 Ti 宝石具有宽的光谱带宽, 波长可调谐范围 $0.68 - 1.18 \mu\text{m}$. 利用自锁模技术已获得最短脉冲 8fs. 并且可在 $1.06 \mu\text{m}$ 波长运转. 钛宝石激光器可作为通常 Nd: 玻璃超短光脉冲激光系统的振荡器.

目前法国在里梅尔原子能委员会制造的超短光脉冲激光系统峰值功率超过 100TW ($1\text{TW} = 10^{12}\text{W}$), 能量 30J, 脉宽 300fs. 美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室正在建造 1PW ($1\text{PW} = 10^{15}\text{W}$) 激光系统, 并将在 1995 年正式运转, 以便进行强场物理的研究^[3].

下面我们将就高功率超短脉冲激光系统的一些主要问题加以讨论.

2 超干净飞秒光脉冲的获得

由于 Ti: 宝石有非常宽的荧光带宽, 因此在光泵情况下, 可以激发大量纵模振荡, 也就是可以激发不同波长(或频率)的振荡. 这些模式之间彼此位相同步, 形成模式锁定, 获得超短光脉冲. 这个脉冲宽度可以从飞秒到皮秒宽.

目前市售的 Ti: 宝石激光系统有光谱物理公司生产的海啸(Tsunami)激光系统和相干公司生产的奇迹(Mira)激光系统.

两者均采用高功率氩离子激光泵浦, 但两者锁模方式不同, 光谱物理公司采用声光主动锁模装置, 而相干公司则采用 Ti: 宝石本身光

* 1995 年 3 月 6 日收到初稿, 1995 年 5 月 8 日收到修改稿.

克尔透镜自锁模。

在飞秒运行时,两者均采用棱镜对进行色散补偿,棱镜对的优点就是它可以调色散从负色散到正色散.为了进行波长可调,均需换几套模板.但光谱物理公司同时在腔内加一个狭缝附加调正激光输出波长范围,而相干公司则用双折射滤光片进行微调.

而在皮秒运行时,光谱物理公司则加上薄膜 Gires Tournois 干涉计做一个端镜,并加上反锁系统,波长调谐用双折射滤光片代替狭缝.而相干公司则用薄膜 Gires Tournois 干涉计做一个端镜代替棱镜对进行色散补偿,并用双折射滤光片进行波长调谐.

为了在调谐范围的短波和长波方向输出足够强的锁模激光,需要增强氩离子激光泵浦功率.

在正常运行情况下,海潇系统波长调谐范围为 720 nm 到 1080 nm. 奇迹系统波长调谐范围为 700 nm 到 1000 nm.

图 1 给出相干公司生产的自锁模 Ti: 宝石振荡器装置图.

自锁模 Ti: 宝石振荡器是利用 Ti: 宝石晶

体中光克尔效应导致自聚焦,从而改变光束腔内传播的空间形状这一原理而特别设计的一种光腔.这个自聚焦引起锁模(高峰值功率)相对于连续(低峰值功率)运转有较高的往返增益.这是由于在自聚焦情况下,泵浦激光空间增益轮廓与腔内往返模式重叠增加所造成.进一步,放在腔内某个位置的光阑引起锁模相对于连续运转的往返损耗低.这个全固体技术相似于固体的快饱和吸收体的锁模.

锁模起动可用小的外界扰动产生,如瞬时腔长变化就可以引起光克尔透镜效应以产生足够短的脉冲.

为了获得最短的脉冲,必须使腔内自位相调制与群速度色散补偿相平衡.

Ti: 宝石棒有相对高的正群速度色散,它应该被腔内棱镜对产生的负群速度色散所补偿.同样, Ti: 宝石棒中自位相调制导致的频率啁啾,由调整棱镜到反常色散区所平衡.从而形成短的“类孤子”的输出脉冲.输出脉冲宽度可用平移棱镜,改变腔内群速度色散而调节.而输出波长变化可用旋转双折射滤光片(BRF)调整^[3].

虽然这些脉冲非常短,但在脉冲峰值前有

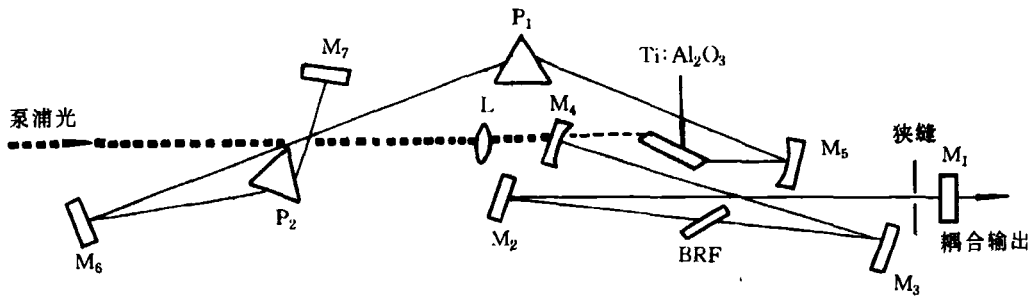


图 1 自锁模 Ti: 宝石振荡器^[3]

几百飞秒宽的背底脉冲.这个脉冲将影响超强激光脉冲与不同靶的相互作用.若这个预脉冲强度小于等离子体产生的阈值,即小于 10^{10} W/cm^2 ,则可防止主脉冲到达前等离子体的形成.若辐照靶的主脉冲强度为 10^{20} W/cm^2 ,那末将要求照射激光脉冲功率对照比超过 10^{10} .

若主脉冲与预脉冲能量之比为 50,而功率

之比约为 1000,则这个值远离要求的对照比 10^{10} ,因此必须清除这个预脉冲.

一个高对照比脉冲清洁器如图 2^[5].它是在两个交叉偏振器之间放置一个单模双折射光纤,由于光纤非线性折射率影响,结果光的偏振状态与强度有关.在低强度时,线偏振光沿着光纤双折射轴之一行进将保持线偏振.由于输出偏振器相对于光纤出口偏振成 90° ,结果使低

强度光达到完全消光.当强度增加时,偏振状态改变,光透过输出偏振器.这个效应是瞬时的,可用于甄别低强度背景和高峰度的脉冲.它可以使对比比提高6个量级^[6].

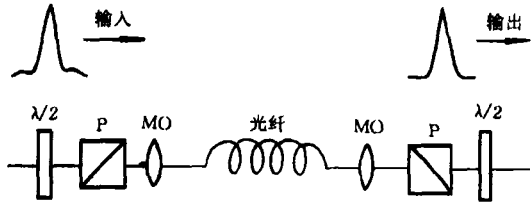


图2 高对比度脉冲清洁剂^[6]

3 脉冲的展宽与压缩

在超短脉冲产生之后,将它通过一个显示出频率与时间有线性关系的脉冲展宽器.这产生一个啁啾并展宽的脉冲.一个啁啾脉冲显示出与时间有关的频率.人们首次在光啁啾脉冲放大器中,用光纤中群速度色散来展宽脉冲.通过光纤,脉冲低频成分(红光)传播快于高频成分(蓝光),结果脉冲展宽和显示为正啁啾或上啁啾(红光先于蓝光).用光栅对提供的负群速度色散进行再压缩^[7].

用光纤光栅的啁啾脉冲放大系统,调节光栅对间隔以抵消光纤的正色散,可校正到二级.压缩脉冲的残余误差主要是由于光栅对与光纤材料色散之间三级色散的不匹配.用这样光纤-光栅系统可以产生的最大压缩比 R 为 $\lambda/\Delta\lambda$ 量级.当 R 超过这个值时,表现为不完全压缩,并在主脉冲的前面和后面产生不希望的波动.例如,有线宽 $\Delta\lambda$ 为 20\AA 的 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 的皮秒脉冲,当采用光纤-光栅系统时,展宽和压缩不能超过500倍.对100fs脉冲,光纤-光栅系统限制压缩比 $R \approx 50$.

在1987年, Martinez 建议用一个正群速度色散的压缩器压缩 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 波长的脉冲.在这种情况下,光纤有负的群速度色散,而脉冲显示一个负的啁啾.脉冲的再压缩要求一个有正群速度色散的装置.他的压缩器是一个在两个反平行

衍射光栅之间放置一个扩束望远镜.不像光纤,这个正色散的压缩器作为一个脉冲展宽器,可在所有级次上与负色散光栅相匹配. Pessot 等^[8]首次演示了这个完全的光栅展宽-压缩系统,其装置如图3.它展宽80fs脉冲超过80ps ($R > 1000$),然后,在没有引入任何时间畸变的情况下,重新压缩脉冲到起始值.这个匹配的展宽-压缩是一个技术突破.许多小组很快演示了展宽和压缩到 10^4 倍.研究某些新技术可进一步改进压缩比超过 10^5 .

最近发展了对脉冲展宽和压缩的体全息透射光栅如图4^[9].这是一个高效率的紧凑结构.

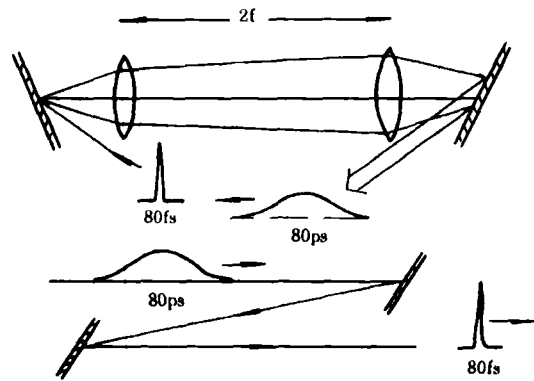


图3 光栅展宽与压缩系统示意图^[6]

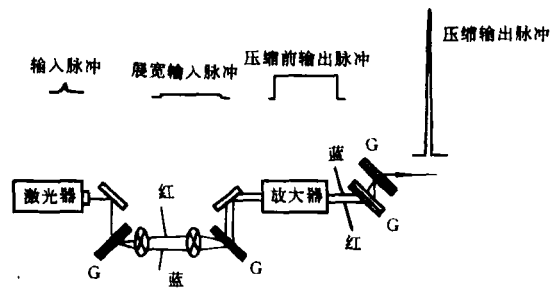


图4 全息光栅展宽和压缩装置^[9]
 (脉冲展宽, 蓝光光程 > 红光光程;
 脉冲压缩, 蓝光光程 < 红光光程;
 G 表示全息光栅)

4 脉冲的放大

从锁模振荡器或光纤出来的单一脉冲能量通常为1nJ量级.因而为了放大到1kJ,则要求

增益饱和值为 10^{12} 量级. 典型的 Nd:玻璃放大器可提供的不饱和增益系数为 0.1 cm^{-1} , 因而为了保证放大到 TW 和 PW 量级, 则要求玻璃激活元件总长度必须为 2 m 和 3 m.

通常采用的放大器结构如下: 从展宽光纤或振荡器出来的 nJ 的光脉冲经过脉冲展宽后, 注入再生放大器放大到 mJ 量级, 再进入通常的放大器系统中. 再生放大器可以是驻波形或环形. 由于再生放大器增益很高, 可达 10^7 . 驻波形再生放大器由于光波退偏, 会使其部分光返回振荡器和光纤, 影响激光器的稳定运转, 而环形放大器则无此问题^[10].

在放大过程中, 放大的自发辐射是预脉冲的主要来源. 它的脉冲宽度可比输入脉冲高几百倍, 然而, 这个噪声不能被压缩器压缩, 从而得到抑制, 压缩后信噪比可改进几百倍. 为了减少放大的自发辐射, 必须在放大级之间加入光开关和空间滤波器.

在激光传输和放大过程中, 由于高强度激光下材料的非线性效应及衍射的影响, 将出现高的空间频率, 这个高的空间频率将引起小尺寸自聚焦, 从而造成光学材料的破坏. 为了消除或减弱小尺寸自聚焦, 人们将常规光学中的软边法和空间滤波技术应用到激光传输中来. 软边光阑主要在近场处抑制高频衍射, 空间滤波是在远场处抑制高频, 它们都可以看作低通滤波器. 近来我们发展了葵花型光阑(国外称为锯齿光阑)滤波技术, 实质上类似于软边光阑.

通常激光系统应包括用空间滤波器分开的许多放大级. 在各个放大级之间用像中继技术, 可以缩短光束传播距离, 减小近场衍射调制. 从初始放大级出来的光束经过滤波、扩束, 然后用葵花型光阑进行截取. 保证进入下一个放大器有大礼帽型空间分布. 然后通过多级空间滤波器进行四倍焦距成像(称 4f 成像), 可保证系统中平顶光滑分布光束的中继传输. 放大级之间区域由衍射引起的强度调制, 由于它不在工作物质内产生, 因而对细丝没影响.

5 太瓦激光系统

超短光脉冲及其与物质相互作用的研究,

25 卷 (1996 年) 第 6 期

引起世界范围的广泛兴趣, 日本已把它作为六个优先研究领域之一.

近年来除注意发展钛宝石激光系统产生超短光脉冲外, 又开发了 Cr:LiSrAlF₆ (Cr:LiSAF) 激光材料. Cr:LiSAF 有宽带辐射谱、好的热学特性、宽的吸收带和足够长的上能级寿命、允许用闪光灯和二极管激光泵浦, 它可以用来产生和放大飞秒光脉冲, Cr:LiSAF 的调谐范围为 $0.78\text{--}1.01 \mu\text{m}$.

利用连续氩和氦离子激光器泵浦 Cr:LiSAF 自锁模振荡器已产生短到 33fs 的光脉冲. 根据预测由于 Cr:LiSAF 有比 Ti:宝石好的较低的高级色散值, 可能获得比 Ti:宝石更短的脉冲^[11].

在劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL), 采用 Cr:LiSAF 来放大 Ti:宝石激光输出的飞秒脉冲, 峰值功率超过 2TW.

在中央佛罗里达大学的光学和激光研究、教育中心, 建立了可产生 8TW 脉冲的 Cr:LiSAF 系统.

2-TW 的 LLNL 系统, 开始用一个自锁模 Ti:宝石振荡器以重复率 76 MHz 产生能量 8 nJ、脉宽 110fs 的脉冲(图 5). 这个脉冲列注入一个 1800 线对/mm 衍射光栅脉冲展宽器, 以使脉冲宽度由 110fs 增加到 500ps. 然后这个展宽脉冲注进一个环形 Cr:LiSAF 再生放大器. 这个腔有一个单一的 $4 \times 50 \text{ mm}$ 闪光灯泵浦掺杂 2% 的 Cr:LiSAF 棒. 一个半波普克尔盒和一个零级半波板从加宽的脉冲列中分出单一脉冲.

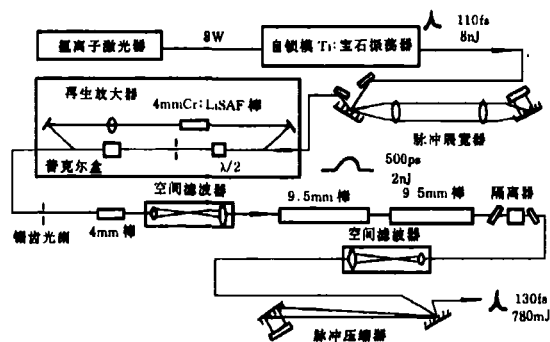


图 5 130 fs Cr:LiSAF 激光系统^[11]

Cr:LiSAF 放大器头用 60 J 电能泵浦, 显示单程增益 2.8, 相应的泵浦效率 1.5%. 这个再生放大器正常运行时输出 10—12 mJ. 由于腔中往返损耗限制往返净增益到 1.6, 为达到总的净增益 5×10^6 , 必须使脉冲在腔内往返 34 次.

在再生放大器后, 光束采用中继成像技术, 通过一个 4×65 mm Cr:LiSAF 放大器和一对 9.5×120 mm 放大器. 大的放大器可以 1Hz 重复率运转, 而观测不到热聚焦和双折射效应. 这些放大器产生 450 mJ 的加宽脉冲. 在压缩前, 用真空滤波器 ($M=4, f/41$) 扩束. 这个脉冲双程通过光栅对脉冲压缩器, 总体能量效率 55%. 压缩产生 130 fs 变换限制脉冲, 能量高于 250 mJ.

采用高质量的棒, 这个系统可产生近衍射极限的光束 (1.5 倍). 这个激光可进行许多强场物理方面的研究.

6 拍瓦脉冲的产生

所有高功率啁啾脉冲放大器激光系统的特点可在劳伦斯·利弗莫尔国家实验室发展设计拍瓦激光器中观测到 (图 6). 这个激光器起始

于一个自锁模的 Ti: 宝石振荡器, 它在 $1.053 \mu\text{m}$ 产生一个 90 fs 的光脉冲. 这个低能 ($\sim 5\text{nJ}$) 变换限制的脉冲被一个单透镜、单光栅的脉冲展宽器展宽 12000 倍到 1.2 ns. 展宽后的脉冲能量减少到 500 pJ. 这个低能脉冲注入到 Ti: 宝石再生放大器中. 采用 Ti: 宝石做增益介质是为了避免与 Nd: 玻璃再生放大器相关的增益变窄. 这个单锁模的再生放大器用作多程放大, 并保证衍射极限的光束质量. 为了在 $1.053 \mu\text{m}$ 达到 10^7 倍的放大, 要求通过增益介质 100 次. 这个再生放大器通常波动小于 3%, 6 mJ 的脉冲输出能. 在再生放大器之后, 这个脉冲 8 次通过 Ti: 宝石功率放大器, 增加脉冲能量到 50 mJ.

令人遗憾的是由于激光泵浦的花费和复杂性, 在波长超过 $1 \mu\text{m}$ Ti: 宝石放大超过 100 mJ 水平是不实际的. 进一步放大用双灯泵浦 19×200 mm 的 LG-760 Nd: 玻璃放大器可达 2J 水平. 这个 2J 的光束可以压缩成短脉冲用在小规模实验中, 或耦合到 Nd: 玻璃功率放大器链中. 这个放大器链是诺瓦激光器的一路. 这个低能啁啾脉冲经过空间滤波、然后注入约 50% 耦合的片状放大器链中, 经过 31.5 cm 片状放大器, 预期可输出能量 1.6 kJ. 这个光束然后扩束

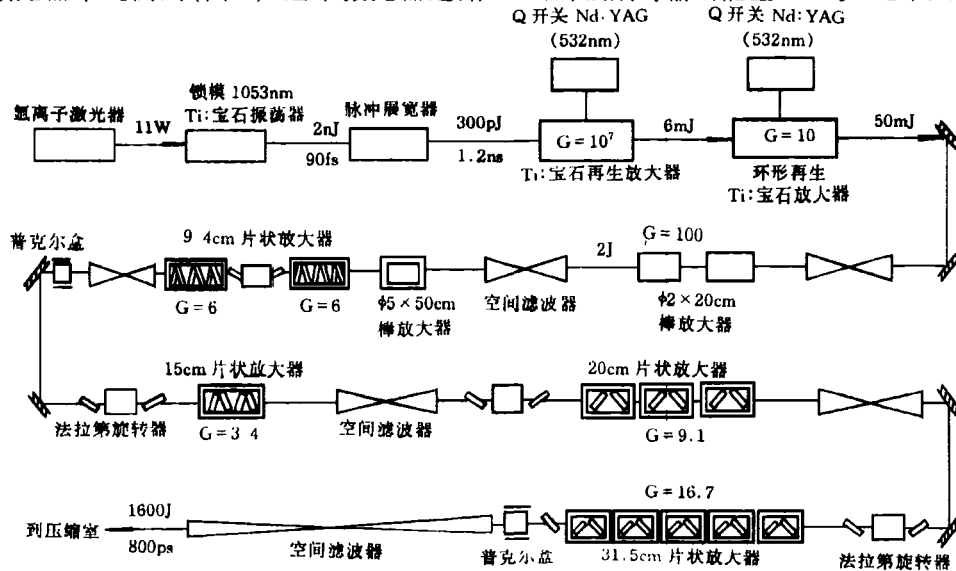


图 6 发展中的拍瓦激光系统^[12]

到 40cm, 再进行脉冲压缩。

拍瓦激光器最有挑战的问题是几千焦耳、亚皮秒脉冲的压缩和聚焦。为了压缩 1.6kJ 脉冲在 500 fs 宽度以下, 要求生产破坏阈值超过 1.5J/cm², 尺寸为 60cm × 110cm 的高功率衍射光栅。商业上出售的最大高效率衍射光栅是 25cm × 40cm 的金属光栅, 它对 300ps 脉冲衍射效率高于 92%, 破坏阈值大于 250mJ/cm²。在劳伦斯·利弗莫尔国家实验室, 发展了金光栅, 它对 300ps 脉冲的衍射效率超过 96%, 破坏阈值超过 400 mJ/cm²。然而, 金属光栅这个改进的破坏阈值仍是不够的。为此, 研究了介电材料的反射光栅新方案。理论上它可以有高的衍射效率和极高的破坏阈值。迄今, 已生产了以 ZnS 为基的衍射光栅, 它对 500 ps 脉冲, 在 1.053μm 时, 衍射效率高于 96%, 破坏阈值高于 1J/cm²。氧化物材料制作的光栅, 估计对 500 ps 脉冲可增强破坏阈值超过 3J/cm², 它可以压缩几千焦耳的脉冲。

计划在 1995 年完全运行的拍瓦激光器,

它可在直径 40cm、波长 1.053μm 时提供 1kJ 的脉冲输出。这个脉冲设计成在脉宽 500 fs 和 20 ps 之间可调。在一个 f/3 聚焦系统中, 可聚焦成两倍衍射极限, 聚焦照度好于 10²¹W/cm²。

7 峰值功率的极限

即使拍瓦激光器, 仍低于峰值功率的理论极限。这个极限可以估计为可提取能量(近似饱和和光强)与增益带宽确定的最小脉宽(忽略增益变窄)之比。假定时间与带宽的乘积 $\Delta\nu_a \cdot \Delta\tau = 0.5$, 那末可估计单位面积峰值功率极限 $P_{理}$ 为

$$P_{理} = 2E_{饱和}\Delta\nu_a$$

对不同材料的理论峰值功率可估计如表 1。原则上, 用紧凑系统可得到 100 TW 的光脉冲, 用硅酸盐和磷酸盐钽玻璃混合以加大增益带宽的大口径(1M)系统, 甚至可获得 1EW (1EW = 10¹⁸W) 的激光脉冲。这个高功率啁啾脉冲放大系统主要受限于功率密度高于 10¹³W/cm² 的展宽和压缩所要求的技术。

表 1 不同材料的理论峰值功率

激光器类型	发射截面 (10 ⁻²⁰ cm ²)	Δλ (nm)	τ (fs)	P _{th} (TW/cm ²)
磷酸盐钽玻璃	4	22	80	60
硅酸盐钽玻璃	2.3	28	60	100
硅酸盐和磷酸盐钽玻璃组合	1.5	60	30	400
掺钛蓝宝石	30	120	8	120
金绿宝石	1	100	10	2000
掺铈的氟铝酸铯锂	3	50	15	300

这个光束要聚焦成 4μm 的光斑, 则光功率密度可达 10²⁵W/cm²。

啁啾脉冲放大的太瓦及拍瓦激光器的发展将对强激光辐射与物质的相互作用提供新的手段。

致谢 感谢高功率激光物理联合实验室的支持, 同时感谢徐晓言在稿件制作中给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] D. Strickland and G. Mourou, *Opt. Commun.*, **56**(1985), 219.
- [2] D. E. Martinez, *IEEE J. Quantum Electron.*, **23**(1987), 1385.
- [3] 孟绍贤, 强激光与粒子束, **6**(1994), 622.
- [4] D. J. Kuizenga and A. E. Siegman, *IEEE J. Quantum Electron.*, **6**(1970), 694.
- [5] D. E. Spence, P. N. Kean and W. Sibbett, *Opt. Lett.*,

- 16(1991), 694.
- [6] J.L. Tapie and G. Mourou, *Opt. Lett.*, 17(1992), 136.
- [7] E.B. Treacy., *IEEE. J. Quantum Electron.*, 5(1969), 454.
- [8] M. Pessot et al., *Opt. commun.*, 62(1987), 419.
- [9] H.W. Messenger., *Laser Focus World*, 29-9(1993), 69.
- [10] M.D. Perry. et al., *Opt. Lett.*, 15(1990), 381.
- [11] M.D. Perry et al., *Laser Focus World*, 29-9(1993), 85.
- [12] M.D. Perry and G. Mourou., *Science*, 264(1994), 917.

美国科学院国家材料顾问委员会建议“使旧材料学会新技巧”

美国科学院的国家材料顾问委员会受 NASA 和五角大楼高级研究项目部 (Advanced Research Projects Agency) 的委托, 提出了《扩展传感器材料的视野》(Expanding the Vision of Sensor Materials¹⁾) 报告. 报告认为: 激光和光纤传感在发展工业和研究用新传感器方面的前景光明, 例如, 它可用来监测树脂热固过程和半导体加工过程, 它在能感知和补偿形状变化的“智能”结构中和新的化学传感器中也可以起重要作用。

报告呼吁: 政府不宜重点支持发展用于传感器的新材料, 而是应该集中支持将原来为其他目的发展出来的材料应用于传感器, 这样传感器会发展得更快、更省。

主持此项工作的 R. Schafrik 说: “并不是所有人对以上建议都有同感。”他认为研究传感器用材料的学者和实验设计传感器的学者之间常常互不了解, 存在着隔阂. 委员会强烈建议联邦政府继续支持大学的传感器领域的研究, 特别是 10 年内难于达到商用的研究。

顾问委员会强调要使旧材料学会新技巧。例如,

原来用于通信的纤维光学元件已在传感器仪器中得到许多应用. 以监测用于飞机部件和印刷电路板的树脂固化为例, 过去用热电偶只能测量温度, 并且它还要操作人员手工放置, 难于大规模生产, 纤维光学系统则可以监测树脂的关键特性, 从而可以自动调整温度和压力, 对树脂固化实现“智能化加工”。利用从树脂散射出来的激光可以测定树脂固化的程度. 委员会认为, 还可以由此得到更多数据, 如粘滞度和热容量等。

报告认为: “纤维光学技术有许多优点: 尺寸小, 耐用, 可以在苛刻、难接近的环境运作, 结构简单, 可以在热压器中同时多处监测和价格低廉。”

委员会主张, 政府赞助的重点项目中应“把传感器作为一个单独的发展领域”, 而不仅仅是一个更大项目中的一部分。

(中国科学技术大学基础物理中心吴自勤
编译自《Laser Focus World》1995 年 8 月号
第 49 页)

1) 可向 National Academy Press, 2101 Constitution Avenue NW, Box 285, Washington, DC 20055 购买, 价格为 35 美元。