

赵玉钧

## 摘要

经过十年，已建成了中红外先进化学激光器(MIRACL)和海石(Sealite)光束定向器(SLBD)，并将它们运到了新墨西哥州白沙导弹试验场的高能激光系统试验站(HELSTS)，组合成最大的和功率最大的高能激光系统，从那时起，MIRACL/SLBD系统已被用来发展和演示高功率光学部件和光束控制技术。并已经进行了一系列高功率激光的水平的和近于垂直光路的传输、跟踪和光束控制实验。并成功地进行了高能激光辐射对亚音速和超音速飞行靶的易损性的演示实验。

## 历史

海军高能激光(HEL)计划始于1971年负责该计划管理的办公室的建立。计划的目的是为水面舰只发展一种对抗反导弹的HEL技术。当时该计划重点是建造基于CO(D2)激光技术的实验HEL系统。该系统将要建在一艘改装的跟踪舰上并进行海面实验。

1973年，TRW公司演示了化学激光技术可以定标放大到高平均功率。连续波氟化氘(DF)化学激光器在3.8 μm附近的几个波段发出受激光辐射，在海平面上方大气中它的传输要比CO(D2)激光器发生了10.6 μm辐射好得多。因此，海军放弃了其原来的建立一个海上实验HEL系统并进行试验的计划，转而联合ARPA共同投资TRW以建造一个定标放大的DF激光器。这台激光器被称作Navy-ARPA化学激光器(NACL)，该装置功率设计值比它的原型要大一个数量级。并计划在TRW公司在加州试验站Capistrano进行NACL的试验。当海军的瞄准跟踪装置(NPT)由Hnyhes(休斯)飞机公司在洛杉矶建成并随后运到Capistrano之后，该激光器就与之组合在一起构成一个实验FEL系统。NACL/NPT将能大大超过以往的任何高能激光系统，并将在组合激光器和光束定向器方面提供非常有价值的技术经验。1978年3月，海军利用组合的NACL/NPT系统在Capistrano成功地进行了打靶试验，并且破坏了飞行中陶式(TOW)反坦克导弹。该导弹当时正以接近音速的速度和较低的弹道飞过激光器上空。这一成果给HEL战术武器将能达到其预想目标提供了最令人信服证明。

在上述打靶的两年之前，即1976年夏天，国会曾指令国防部为未来激光系统试验选择一个国家试验场地。一个三军委员会研究了候选地点，并选中了白沙导弹试验场，于是高能激光系统试验站(HELSTF)开始起步。1987年，海军开始实施海石(Sea Lite)计划。海石想走的是Capistrano的NACL/NPT实验系统之后的下一着棋；海军将要建立一个武器级功率和化学激光系统，在HELSTF安装和进行试验。计划进行的试验是反真实的反舰导弹靶，以演示激光武器可以在实战有效的范围内对大型快速导弹造成致命的破坏。海石系统的设计是具有武器性能的，但是当时为了节省经费和抢时间，尽可能多的工程部件采用已经成熟的技术，并且没有花费材料来进一步减少尺寸和重量或进一步使其武器化。在海石计划之后的下一步棋还将把上述考虑提到日程。

1980年9月，中红外先进化学激光器(MIRACL)首次进行试验。MIRACL是NACL的后继者，也是由TRW公司为海军研制的，作为海石计划中所用的激光器。其输出功率为兆瓦级，这使其成为自由世界中功率最大的连续波激光器。1983年，在经过全面性能评价之后，MIRACL被运到了HELSTF。同年，海石光束定向器(SLBD)开始工作，SLBD的孔径比NPT大两倍，并且设计得适用于MIRACL的光束。休斯飞机公司是通过竞争赢得了建造SLBD的合同的。

1983年，国会取消了海军的海石计划，据说是认为DOD太多地重视长波红外激光器技术。国会要求DOD对新出现的可见/UV波段的准分子激光技术予以更多的注意。不幸的是，国会没有认识到对于海平面中等距离(十公里或更少)的战术激光方案来说，中红外波长优于极短波长激光。同时，在输出功率方面，准分子激光器当时还比化学激光器落后几个数量级。考虑到MIRACL激光器对DOD进行破坏和易损性试验的价值，国会又向DARPA的84财年预算多投入2500万美元，用于继续在HELSTF的陆军的三军试验站安装MIRACL。DARPA要求海军安排他们的发展计划以代替海石计划。

1984年SDIO成立，并接管了DARPA的所有定向能计划，包括MIRACL/SLBD。海军作为技术负责代理人继续为人服务。SDIO投资完成了SLBD并在HELSTF将它与MIRACL组合。因为在此之前从未安装或试验过MIRACL/SLBD这样大尺寸和如此复杂的激光系统，所以SDIO感到进行工程实验是很有价值的。从组合系统之后，又计划并进行了利用MIRACL/SLBD系统的一系列实验。本文后面主要介绍激光器及光束定向

器，还介绍利用这些装置所进行的实验。

## 中红外先进化学激光器 (MIRACL)

中红外先进化学激光器是在七十年代后期TRW 公司执行一项技术和工程发展计划为海军建造的。最早发展的是基线 (Baseline) 演示激光器，其后是海军-ARPA 化学激光器，在此基础上，MIRACL是首先在自由世界发展的第一台兆瓦级连续波化学激光器。该激光器是氟化氙化学激光器，其能谱分布在 $3.6 \sim 4.0 \mu\text{m}$  波段之间的大约10条激发线谱上。自从该装置于1980年首次实现受激光辐射以来，它已经累积进行了2000秒以上的受激发射时间。1984年，该装置被从TRW 搬运到HELSTF的现址。它是美国迄今为止生产的达到这样大平均功率的仅有的一台激光器。

MIRACL (图1) 外形很象一个火箭发动机，其中燃料[ 乙烯 $\text{C}(\text{D}_2)\text{H}(4)$ ]与氧化剂( 三氟化氮) 一起燃烧。燃烧产物之一是自由的激发态氟原子。就在燃烧室的下游处，氙气和氦气喷射进燃烧产物中。氙气与激发态氟原子化合后形成激发态的氟化氙 (DF) 分子，此时氦的作用是使反应保持稳定并控制温度。在激发态的燃烧产物气体外面安放激光谐振腔，便可提取光能。该腔体可以自动冷却并且一直运行到耗尽所有燃料为止，通过改变燃料流动速率和混合比例就可以使激光器的输出功率从满功率到满功率的13% 之间变化。在满功率运行时谐振腔的压力是30 千。尾气通过激光谐振腔以后流入两个方形扩散器容器中，在那里的压强又被动地恢复到200 千。再通过两个100 米长的蒸汽引射器 (ejector) 使压强恢复到大气压。此后接着是气体洗涤，即用大量喷淋的细水滴来清洗流速为40kg/s的尾气。最后再用风在极短距离内把剩下的气体吹散到安全水平。

在激光腔到束定向器之间的光路上有10块水冷却的反射镜。在谐振腔中按共焦非稳结构排列的凸与凹谐振腔镜之间产生激射。光能的耦合输出由腔内的一个刮刀镜完成，该镜子与光轴成 $45^\circ$  角，然后，激光束反射并通过一个三单元光束整形望远镜，再与SeaLite光速定向器的输入端相匹配，并通过一个空气窗口后使光束从30千空腔传输到大气中。

在光学传输线上有一个低衍射效率的线光栅，它的作用是从MIRACL光束中提取出一个小样本光束，再进入到光束诊断仪器和角度测量传感器以进行光束的自动准直定位。角度测量是靠两个四象限 (quad) 探测器完成的，一个用于测量MIRACL光束，另一个用于氦氙引导光束。束探测器又驱动快速转向镜以保持谐振腔与光学传输组件的准直。氦氙探测器还探测从光束定向器传到一个分离塔上的准直光束，并驱动SLBD的塔基上的转向镜以使高能激光束与SeaLite 光束定向器准直。用这种方法，整个光学线路就可以从头到尾保持准直。

海石光束定向器 (SLBD) 海石 (Sea Lite) 光束定向器有一个装在常平架上的1.8 米直径扩束望远镜，该望远镜用常规的俯仰跟瞄 (elevation-over-train) 常平架瞄准，并可提供较大角度变化。高能激光束通过由几组件输镜组成的定向器线路。在俯仰常平架上安放了一个Cassegrain反射束扩束器，它把光束扩展到1.5 米外径，然后再根据所测的靶距调整扩束器次镜的轴向位置，就可以使光束在靶目标上聚焦为一个小的光斑。

高能激光器光路上的所有传输镜及扩束器的次级镜都是水冷却的。由于扩展后的高能激光束打在较大的主镜上，其功率密度较低，所以主镜不需要水冷却。这个设计是用低膨胀玻璃减轻重量。干氮 (Dry) 沿高能激光器光路流过以便减小光束定向器中空气被光束加热引起的光路畸变。在扩束器出口孔径处有一个空气窗口，它可使空气横向流过，其作用是使内部轴向流动的内部调节气体和外部大气保持平滑变化，并防止把外部未调节空气吸入光束定向器中。

在设计光束定向器的控制系统中首先要考虑的就是常平架结构。精确光束定向器是相对于惯性稳定的瞄准线坐标而运行的，它包含一个稳定元件—陀螺稳定结构，它对靶目标进行瞄准。高能激光光束的光轴和瞄准器内径瞄准线轴都准直到稳定器所瞄准的方向。

使瞄准器内径瞄准线轴和高能激光光束的光轴与稳定元件保持准直的一种方法是自然地把跟踪传感器与光束定向器安装在准直元件上。这种结构要求有一个子系统，以使激光束与扩束器的轴保持准直。美国所有早期的高能激光光束定向器，包括NPT，都把靶跟踪和扩束器安装在多个常平架装置的最内部的稳定常平架上。因为此时定向器必须精密瞄准运动目标，所以一个笨重的稳定组元就限制了它的瞄准运动性能。

为了改善其性能，SLBD的稳定部件只包含稳定所必须的陀螺仪和一个参考镜。这可以使用主动光束使靶跟踪器的瞄准线轴和高能激光光轴与稳定反射镜相准直。扩束器和靶跟踪则安装在常规的用于控制

光束俯仰常平架结构中的俯仰常平架上。该常平架结构也支撑参考镜和转向镜并使其保持稳定，转向镜的作用是主动地使跟踪器的瞄准线轴和高能激光束光轴与稳定参考镜相准直。对这种结构，支撑着跟踪装置与扩束器的大常平架并不要求精确地瞄准目标。主动准直子系统操纵着跟踪器的瞄准线轴和高能激光束的光轴（指从扩束器光轴偏离的光轴）使其自动地校正大常平架的瞄准误差。

SLBD用装在俯仰常平架上的成像传感器，它通过一个转向镜观测靶目标。主传感器是一个带40cm望远镜的8 ~11.5 $\mu\text{m}$ 波段的FLIR（前视红外系统）。并用了带空间选通(gate)的质心和相关跟踪算法来尽量减少跟踪目标时的背景噪音。

## 系统综合实验

### 5.1 对静态靶的高功率试验

1986年5月和8月之间，在HELSTF利用组合的MIRACL/SLBD系统进行了第一次光束控制实验。为了减小由于MIRACL光束对错方向而导致SLBD未冷却部件热损伤的风险，八发试验系列中每发的功率和脉冲时间都是逐渐增加的，直到最后达到激光器满功率10秒钟运行的目标。在此试验系列中，SLBD跟踪的是500米场地处的一个静态靶，MIRACL的光束通过正好位于SLBD的出口孔径外面的一个全孔径小孔光栅。小孔光栅(hole giating)的目的是允许MIRACL光束的低功率样本传过大气，这样可以避免热晕妨碍SLBD的光学性能。

### 5.2 带飞行靶的低功率试验

1987年2月和8日之间，在HELSTF进行了飞机跟瞄试验，目的是检验SLBD系统捕获与跟踪飞行目标的能力。对这次试验，用一个低功率可见激光束代替MIRACL激光束。在SLBD的基座上安装了一个Kr离子激光器（波长0.647  $\mu\text{m}$ ）。该激光束也用转向镜准直到SLBD的输入口，所用的方法与高功率MIRACL光束试验时准直方法一样。共试验了三种低功率方案。

第一方案是用UH-1直升飞机。在它上面安装了踪光源和光束到靶上的记数传感器，这些是Johns Hopkins应用物理实验室研制的。在靶上以靶心为中心安装一半透明的膜板，其上安装了很多独立的高数字速率的轻便传感器。安装在膜板后面的光学传感器可测量激光光斑的位置。第二种低功率方案是用飞行靶机来检验从白沙到SLBD的雷达交接情况。第三种也是最后一种低功率方案是用BQM-34型无人靶机，它以400节(1.85公里/小时=1节)速度穿过3公里高空飞行，通过它来检验SLBD对飞行靶的捕获和交接，精密跟踪和对瞄准点的位置修正能力。

### 5.3 带飞行目标的高功率试验

在这些试验中，SLBD捕获并跟踪BQM-34无人靶机并将MIRACL的满功率光束聚焦到预先选择好的靶目标瞄准点上。无人靶机上装有飞行靶列阵，是由国际科学应用公司设计的。靶列阵由6996个热耦合传感器组成，它们可承受满功率激光束达几秒钟。这些试验的结果提供了光束到靶的抖动、位移及从预设瞄准点的飘移的最直接的测量。这些数据都可用来改进系统性能和校验计算机数值模拟。

### 5.4 杀伤动力学试验

1987年和1989年，利用MIRACL/SLBD系统进行了杀伤效能试验，支持试验者是平衡技术倡议。这些试验和预想的性能都是BQM-34靶机上的飞行靶列阵预先进行的瞄准试验为基础的。在1987年的试验中，一架亚音速BQM-34无人机在飞过激光场地上空时被成功地瞄准，并被击中破坏。将距离增大一倍时，又把试验重复一次，也同样取得成功。在所有试验中，由MIRACL光束所造成的破坏及无人机后的行为都与预先试验所预示的完全符合。这些试验第一次令人信服地证明，对飞行靶的杀伤模型是正确的。这些模型是很多年前根据静态靶试验及对导弹弹道破坏进行的计算机分析而发展起来的。

1989年春，又用MIRACL/SLBD系统进行了超音速VANDAL导弹试验，这是一种变型的TALOS地对空导弹。它是冲压式喷气发动机推动的，并且速度可以超过2马赫。这种导弹又大又重，是任何空中防御系统都难以对付的靶。该试验中计划让VANDAL导弹以最大速度和较低的飞行弹道飞过激光试验场地上空，以模拟超速巡航导弹正在攻击激光系统附近的一个目标。当VANDAL导弹从激光试验场地几英里外的发射台发射升空后，就被测距雷达所跟踪。然后测距雷达把交接座标提供给SLBD上的红外跟踪器，此时VANDAL已接近场地。SLBD在VANDAL还在试验的点火允许窗口之外时就已捕获到了目标。一旦VANDAL进入点火允许窗口，MIRACL就开火。几乎是同时发生的导弹灾难性破坏向人们提供了最令人信服的证明，证

明高能激光器可以防御反舰导弹。而且MIRACL/SLBD 的系统性能完全和预先试验预言的完全一致，而且对高能激光系统在战术应用中作用如何有了深入的了解。

## 5.5 高空精密瞄准试验

1988年9月，作出了一项使MIRACL/SLBD 系统升级的决定，以便研制一束高能激光束从地面到高空或空间的精密跟踪与瞄准所涉及到的技术与工程问题。升级的首要目的是增加SLBD系统的敏感度、精度和带宽，并使SLBD系统有能力在激光发射时通过扩束器的全孔径跟踪目标。这将允许跟踪器沿MIRACL光束所起的同一条光线跟瞄。以前，跟踪器总是对扩束器有一个偏移，并沿一个不同的光线瞄准目标。这项计划所需要的主要技术进步就在于有一个光学双向选通装置，它可以从输出的高能激光束中将很低水平的返回跟踪信号区分出来。

随着改造升级工作的完成，进行了一系列试验来改进系统性能。1991年2月，首先用一个行星体作跟踪光源。这提供了一个评价各种跟踪技术的好机会。由于采用了高功率光束，演示成功了高带宽全孔径跟踪不丢失跟踪目标而没有发生跟踪不稳定性。MIRACL输出功率水平在3比1 范围内变化，并使新光学元件在各种激光功率水平下受照射。

该系列中的第二个试验在6月进行，是第一次用一个专门装配的无人驾驶飞机在13公里高度飞行时进行的试验。这个高空靶系统（称作HATS）是用来快速精确测量高能激光束在靶上聚焦的强度分析，并用遥测发射器把数据发送到HELSTF的记录系统。无人驾驶飞机成功地发射和飞行，但跟踪器发生问题未能进行精密跟踪。

8月份又进行了第三次试验，这次还是用HATS飞行器。这次试验的目的是演示精密跟踪与瞄准的MIRACL光束，并进一步研究MIRACL光束对精度跟踪器的干涉效应，还要确定MIRACL光束在测试设备列阵上的最佳聚焦。该试验获得极大的成功。以前的试验已经断定问题涉及HEL 光束干涉跟踪，这次试验表明，这些困难已完全解决。测试设备列阵看到了一个稳定的，聚焦很好的HEL 光束，而且非常接近预想的瞄准点。

第四次也是最后一次试验是10月份进行的，用的还是HATS系统。这次试验的目的是，演示MIRACL光束稳定的、精密的而且长时间的跟踪与瞄准过程；演示高性能激光束准直技术；并检验适用于把HEL 光束定位在靶上和维持下去的光束瞄准技术。这次试验所有关键目标都已达到并且获得所希望的性能。

## 结论

MIRACL/SLBD系统仍是美国仅有的综合的正在运行的高能激光系统。若干年内还不大可能有一个性能与它相等或超过它的后继系统，以能评价其战术或战略应用价值。MIRACL/SLBD 提供了研究战术或战略应用方面的一系列重要技术问题的机会。 一系列重要技术问题的机会。