

美国高能激光武器的发展及其面临的挑战(下篇)

任国光 黄裕年

(北京应用物理与计算数学研究所,北京,100088)

摘要: 首先介绍了美国高能激光武器的发展战略和高层技术路线(上篇)。然后分别评述了近一年来机载战区激光武器,战术高能激光武器和机载战术激光武器,天基激光武器,地基激光反卫星武器和舰载激光武器取得的重大进展,分析和讨论了它们面临的技术挑战和可能采取的对策(下篇)。

关键词: 高能激光武器 化学氧碘激光器 氟化氢化学激光器 二极管泵浦固体激光器 自由电子激光器

Developments and challenges for American high-energy laser weapons(Part 2)

Ren Guoguang, Huang Yunian

(Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing, 100088)

Abstract: The developing strategy and high-level roadmap of American high-energy laser weapons is first described in the paper. Then the significant progress of various laser weapons, such as war-zone airborne laser weapons, tactical high-energy laser weapons, space-based laser weapons, ground-based laser weapons and ship-borne laser weapons is reviewed. Finally, the technical challenges and possible measures are discussed and analyzed.

Key words: high-energy laser weapon COIL HF/DF chemical laser DPL FEL

3 机载战区激光武器*

3.1 机载激光计划完成关键设计评审,开始改装激光战机并安装设备

机载激光计划经过 3 年半的高强度设计和降低风险的工作,于 2000 年 4 月 25~27 日完成了最后的关键评审^[11]。实现了研制机载激光样机的两大关键里程碑之一,它标志着将开始改装飞机平台并开始安装设备。波音 747-400F 飞机已生产出来,并开始了为期 18 个月的改装工作,主要的设备安装工作是 2001 年春天安装激光炮塔,2001 年 7 月开始安装高级的 COIL 激光器和跟瞄系统,并将于明年下半年开始进行严格的地面和飞行试验。

在机载激光计划确定设计和降低风险阶段的这 3 年半时间里,机载激光小组一直在设计、研制、集成和试验机载激光设计。机载激光计划已制造和试验了许多硬件,包括飞行重量 COIL 模块、发射望远镜主镜、激光炮塔及其光学质量半球形窗、用于远程跟踪导弹的照像机、快速倾斜镜、子标度变形镜、试验性照明激光器和定标束控试验台等。利用计算机工具研究了武器系统的集成问题;对激光器排气系统设计成功地进行了广泛的高逼真度试验,过氧化氢分解气体发生器已通过关键评审;激光模块和束控演示验证取得巨大成功;通过广泛的研究和试验,用数据证明和表征了机载激光在作战环境中将面临的光学湍流问题,并在白沙导弹靶场成

*1,2 部分请参阅《激光技术》第 25 卷第 4 期第 241 页。

功地进行了大气补偿实验。

3.2 关键技术的重大进展

一年来,机载激光关键技术取得了3项重大进展,制造和试验了改进的飞行重量 COIL 模块,完成了长水平路径的大气补偿试验和制造了束控系统的4个硬件。

3.2.1 改进的飞行重量激光器模块满足/超过了机载激光的作战要求 几十千瓦的飞行重量 COIL 模块是载激光武器系统的基本积木式部件。在1998年8月的试验中,飞行重量模块 HLM-2 的输出功率达到了设计值的110%。在 HLM-2 基础上,针对在试验中出现的一些问题和优化作战环境,对 HLM-2 作了全面的改进,并把在试验中获得的技术经验纳入了改进的飞行重量模块 HLM-3 的设计中,同时,在工程设计方面也作了重大的改进。在1999年5~8月的4个月试验中,改进后的 HLM-3 的激光功率和光束质量都超过了机载激光作战系统的要求^[12]。这标志着机载激光武器系统向部署迈出了关键的一步。它基本上是第1个实际的飞行重量模块的原型,将装入机载激光作战样机。在这样短的时间内就成功地制造和试验了实际的机载激光系统的飞行重量激光器模块,充分证明了高功率化学氧碘激光器技术已经成熟。

HLM-3 的试验是在它的整个运行范围内进行的,从代表来自“新鲜化学弹仓”的第1发,直到代表来自“耗尽化学弹仓”的最后一发,在所有的试验情况下,都产生了足够的功率。它证明在机载激光样机系统的重量限制下,装有足够化合物的激光器模块能满足机载激光任务的要求。试验计划的另一个重要特点是,对 HLM-3 模块进行的所有关键的功率和束质测量,都是在代表机载激光实际工作条件的热和高压腔情况下完成的。这些试验的每一项工作,都尽可能地按实际情况进行,因为要采用这些试验结果最后确定模块的设计,并制造机载激光样机所需的6个模块。样机的第1个模块按计划将在2000年下半年进行试验。

3.2.2 长水平路径的激光大气补偿试验取得重大成就 1999年,美国空军在白沙导弹靶场的北奥斯库拉山顶成功地进行了激光“动态补偿实验”,实验为期3个月,于9月结束^[13]。实验证明,空军的束控系统能使激光束沿着长的几乎水平的路径传输到一个运动靶板上,此靶板放在飞行轨迹与战区导弹弹道相同的飞机上。试验极其成功,证明经自适应光学补偿的激光在靶板上产生的光斑,比未补偿的光斑减小了5~20倍。在强湍流情况下的这一史无前例的性能,是空军研究实验室在过去10年里取得的最大成就之一,并为未来的定向能武器应用铺平了道路。这项研究与试验工作主要是为机载激光计划服务的,但对天基激光,高空气球实验和未来先进的战术定向能武器也十分有用。高能激光应用于战术武器时,激光束必须通过稠密大气层一段短的路程。

动态补偿实验再现了机载激光束控系统的功能,是这类系统的第1次试验。初期的试验将利用飞机上的二极管激光器点源,为跟踪和自适应光学提供合作信标。在这些试验里,从靶板上某些所选位置发射的点源信标光将被北奥斯库拉山顶(高2.4km)的1m望远镜接收,并传送到自适应光学和跟踪系统。随着跟踪和自适应光学系统的闭环,一束模拟高能激光的10W刻痕激光从望远镜射向飞机,并被靶板上的探测器检测,共输出将作为质心抖动和 Strehl 比这样一些性能品质因素的度量。补偿大气湍流的自适应光学系统有349个致动器,大致与机载激光样机系统的致动器数目相同。

靶板放在相距51km的萨利纳斯山顶(高2.8km)上或随飞机飞行,飞机飞行高度4km,速度70m/s,距离是36~52km。发射的激光束几乎是水平的,这时大气湍流最为严重。虽然机载激光武器将在12km的高空作战,但从4km高的稠密大气层中收集到的数据,可以定标到较高

的飞行高度和较远的射程。1m ×2.5m 的靶板由 24 ×64 元 InGaAs 探测器阵列组成,对预期的传输情况,其分辨率为 $0.5R / D^{[14]}$ 。

2000 年 9 月,空军又在北奥斯库拉山顶极其成功地进行了“非合作动态补偿实验”。研究人员用 200W 的照明激光器和 100W 的信标激光器照射一个运动目标,而不是采用点源信标照射到飞机上使光路闭环。这次试验还首次在动态定标机载激光交战中采用了扩展信标,演示了高性能自适应光学和边缘跟踪。初步的数据分析表明,降低了光束抖动,提高了 Strehl 比和增加了射到靶板上的激光能量^[15]。

3.3 机载战区激光计划面临的技术挑战和可能采取的对策

机载战区激光武器面临的两大技术挑战是强激光的远程水平传输和兆瓦级 COIL 激光器能否满足飞机平台对重量和体积的要求。

3.3.1 对机载激光大气湍流设计指标和精确表征大气湍流的不同看法 激光的大气传输关系到机载激光计划的成败,所以,计划一开始就不遗余力地研究和表征作战环境中的大气湍流情况,发展自适应光学和束控系统,以便补偿激光在传输中产生的光学畸变。对机载激光计划的批评总是集中在空军测量大气湍流的方法学和激光系统能否补偿大气湍流这样的问题上。美总审计局在 1997 年题为“机载激光面临严重挑战”的报告中提出了两个主要论点:(1) 空军不能精确预测机载激光所遇到的湍流强度,迄今机载激光太依赖于非光学测量;(2) 机载激光遇到的湍流可能是空军设计指标的 4 倍,这将缩短激光射程^[16]。美国防部和国会也对激光射程表示怀疑。

在空军的大气湍流测量中采用了光学和非光学方法,非光学方法费用较低,它包括气动热探头和雷达。总审计局问题的引起是这种非光学方法的测量结果能否用光学方法校正。空军认为用非光学方法能精确测量大气湍流的强度,并用试验证明了非光学与光学测量湍流数据之间的关系。给出了同时收集到的光学数据与非光学数据之间的校正方法。当然这还需进一步的试验,更好地了解大气湍流确定的射程和射程变化,以及评价对性能和作战概念的影响。

另一个测量问题是空军采集的大量大气数据,是用气球作垂直测量,用飞机作水平测量,然后组合成机载激光斜射的湍流数据,但批评者认为数据的精确性不够高。空军于 1998 年夏天开始采用星光闪烁传感器在新墨西哥州进行大气试验。空军在水平方向选择一颗星用此传感器测量射到飞机上的光,并确定闪烁度以表征大气湍流的强度。星光闪烁传感器提供了一种确切测量湍流的方法,而不必进行数据组合。闪烁计记录下在孔径光阑直径内光功率的瞬间起伏,给出功率光谱密度和归一化辐照度的变化。再利用经验的和理论的闪烁公式,就能得出以路径平均的 C_n^2 表示的大气湍流强度。为了提高对星光的灵敏度,研究人员重新设计了包含较长波长的传感器。用新传感器收集大气光学湍流的试验,已于 1999 年秋天开始在韩国和中东进行。2000 年 2 月在上述地区又进行了第 2 轮测量,以收集冬季的光学湍流数据。迄今收集到的数据证实了空军在以前完成的理论研究^[17]。

空军为机载激光规定的大气湍流设计指标是一个晴朗夜空湍流强度的两倍 ($2 \times \text{clear1}$),而总审计局则认为机载激光遇到的实际湍流可能大于设计指标的 4 倍。五角大楼的报告“大气湍流分析”估计,沿路径积分的大气湍流明显高于以前作为系统性能要求的数值。在总审计局的报告发表之前,空军进行了 63 次气球飞行试验,监测湍流强度的变化。这些实验证明 85 % 的时间湍流强度不超过 $2 \times \text{clear1}$ 。为了确保初期的气球试验是精确的,空军在中东和韩国进行了大量气球试验,迄今为止收集到的数据的 81 % 低于空军的设计标准,空军认为即使

在一天的时间里,湍流偶尔超过 $2 \times \text{clear1}$,机载激光也只会受到极小的影响。

为了消除国会会对机载激光的怀疑,空军已提前进行了第 3.2.2 节中所述的激光“动态补偿实验”,激光经过长水平路径传输后,经补偿的靶斑比未经补偿的靶斑缩小了 5~20 倍,充分证明机载激光系统能补偿大气湍流。这一实验结果是回答国会质疑最强有力的事实。

3.3.2 必须进一步降低飞行重量激光器模块的重量和体积 机载激光另一个关键的技术挑战是发展激光装置技术,以满足装入飞机平台所需的重量和体积。从 1996 年 20 多万瓦的 COIL 模块原型到 1998 年的飞行重量模块,重量已从 2720kg 减至 1360kg,这是一项重大的成就,它已满足了机载激光作战样机对激光器提出的要求。然而实际部署的战机将安装 14 个模块,而不是样机的 6 个模块,因此,激光装置的重量还必须降低 1/2,尺寸再减小 1/3,激光器的许多部件必需重新组合和采用先进的材料(如复合材料)制造。其可能采取的对策如下:

(1) 提高激光器的效率——提高化学效率的关键是尽可能地降低单态氧发生器中产生的水,把水对单态氧的猝灭降至最低限制。这需要开发使发生器保持在冷状态运行的方法和发展更有效的冷阱技术。目前,COIL 的化学效率已比较高了,用氩或氮作稀释剂的 COIL 的化学效率分别达到了 30% 和 26%。

(2) 采用新的燃料和化学混合物——目前在重 1360kg 的 COIL 模块中,激光器主体仅重 373kg,而单态氧发生器占了很大份量。这是因为它使用的液体燃料过氧化氢和氢氧化钾混合物很重。正在研究一些代替单态氧的方法,如采用单态 NCl(或单态 NF)代替单态氧泵浦碘原子。因为这类激光器完全以气相反应为基础,因此,其重量有可能降低几倍。另外也在研究利用二极管或电泵浦产生单态氧。

(3) 燃料循环使用——化学激光器消耗的燃料很重,对机载激光来说它差不多占了飞机载重的 1/3,因此开发循环使用燃料的方法至关重要。1999 年,机载激光计划的几项重大改进之一是改变化合物的收集器,使碱性过氧化氢通过系统循环几次,直到它变得无效为止。

(4) 采用塑料件代替钢部件——COIL 的特点之一是工作温度低,且容易达到关键部件的公差。因此,可以用塑料代替金属零部件。塑料激光器的想法是独一无二的,它不仅大大减轻了重量,而且注塑成形降低了成本。

(5) 采用新气源引射器——机载激光系统将采用过氧化氢分解气体发生器作引射器的气源,它减小了激光器压力恢复系统的重量和体积。此方案经过广泛的高逼真度试验后,于 1999 年 12 月通过对过氧化氢分解气体发生器,激光器模块真空管道和阀门的评审。

(6) 激光器高压运行——研制高压运行的 COIL,减小压力恢复系统的重量和体积。

4 天基激光武器

4.1 美开展天基激光集成飞行试验工作,验证天基激光的技术可行性

天基激光计划改由弹道导弹防御局与空军共同管理,由空军具体实施后,空军提出的体系结构概念是:天基激光星座由离地 1290km 的 20 颗激光发射卫星组成,每颗卫星重约 35t。它能在 10s 之内摧毁 4000km 外的一枚弹道导弹。如果敌方发射多枚导弹,激光能在不到 1s 的时间内从一个目标转向另一个目标。每台天基激光器的总发射时间在 200s 到 500s 之间,足以摧毁 100 枚弹道导弹^[18]。

空军也在考虑其它的天基激光体系结构,一个概念是部署 10 颗激光发射卫星和同等数量的轨道反射镜,将激光反射到目标上。第 3 个方案是由一台地基激光器与轨道反射镜阵列配

对,利用激光中继反射杀伤目标,地基激光系统具有不受重量、体积和能源的限制,便于维护等优点,但大型中继镜造价昂贵,并难于装入运载飞行器。

2000年2月弹道导弹防御局与波音、洛克希德-马丁和TRW三公司签定了激光集成飞行试验(SBL IFX)的合同,金额1.27亿美元,为期18~24个月^[19]。这是美国迈向空间武器的一小步,却是重要的一步。该合同要求确定在空间部署一台高功率激光器摧毁弹道导弹的技术可行性,并开始寻求相适应的试验装置。如果SBL IFX计划成功,国防部将评估天基作战系统的效能和成本,以及对威胁作出预测。这个评估将成为建议是否研制、生产和部署天基激光卫星的基础。SBL IFX计划将包括地面、飞行和空间实验,以验证支持建造SBL IFX飞行器设计所需的部件和子系统的技术。

目前,天基激光武器计划采用现有的兆瓦级HF激光器,但正在发展全气态碘激光器作为下一代的天基激光器。因为全气态碘激光器的波长短、重量轻,而且它能穿过大气层传输。HF激光的主要限制是不能在大气中传输,一个补救的方法是采用新型的HF泛频激光器,但目前它只有几千瓦的功率,仍处在发展的初期。估计至少在2020年以前不可能部署天基激光武器,到时也可能采用成熟了的固体激光器。

4.2 Alpha激光器和大型反射镜试验取得进展

近期,天基激光计划将把重点放在地面研究工作上,研制和演示一个作战的天基激光系统,以及设计和研制集成飞行试验飞行器所需的部件和子系统技术。这个子标度飞行器将用作发展技术的空间试验台,更重要的是,它将对系统一体化所面临的挑战提供解决办法。计划2004年在地面演示激光器和束控系统,2006年对航天飞机平台进行关键性评审,空间试验可能在2012年进行。为了准备飞行试验,计划在2004年~2005年之间进行高空气球实验,以便收集有关目标捕获和跟踪,激光瞄准和火控数据。在飞行实验前,还必须在地面进行飞行器头尾相接的试验,为分析在轨飞行提供数据基础。

最近,天基激光计划的Alpha激光器和大型先进反射镜取得了重要的进展。作为Alpha激光器优化计划的一部分,在2000年3月进行的6s发射试验中,激光器的输出功率增加了25%并改善了光束质量^[20]。这项试验是设计和实施SBL IFX所需技术走向成熟的关键一步。SBL IFX激光器与Alpha一样,是圆柱形的HF化学激光器,但它利用了激光器装置在工程上取得的进步,而Alpha是80年代中期设计的。在最近的试验中通过调整“限制器”的位置,使它不妨碍Alpha产生的任何光子到达光学系统产生输出光束。试验中产生的输出光束几乎是圆柱形,而且能量密度更均匀。这些结果加强了在SBL IFX中采用圆柱形激光器的信心。

对大型先进反射镜计划的非冷却变形镜进行了多次高能激光试验,完成了4.5s的闭环波前和抖动控制试验,这是评价用非冷却变形镜代替以前的冷却变形镜的重要里程碑,这不仅大大减轻了重量,而且还消除了冷却水流动引起的严重振动。试验也证明了天基激光束控系统的可行性和耐用性,并为天基激光演示器提供了有价值的设计数据,天基激光的束控系统,主要采用了机载激光计划的束控技术。

4.3 天基激光面临的挑战和未来的发展方向

天基激光武器将能最终实现军事格言“占领制高点”,并有可能使战争模式发生革命性变化。但现有技术不足以支持这一潜力,需要在空间发射技术和光学技术上有突破性进展。

天基激光平台每个重约35t,目前还没有把这样重的物体发射上天的运载火箭,且发射成本是88000美元/kg。所以,必须研制新一代的大推力运载火箭,并把发射成本至少降至44000

美元/kg。为了降低激光器的功率和减少化合物的消耗,天基激光将采用 10~15m 的大型反射镜,且每平方米的重量应在 10~15kg 之间。目前,天基激光大型反射镜的直径仅 4m,且重量远远达不到要求,需要发展涂铝的聚酯薄膜轻质反射镜。天基反射镜技术将采用美国国家航空和航天局为下一代空间望远镜研制的分片式反射镜,它能折叠装入飞行器发射,然后在空间展开。其它的技术挑战包括如何远距离控制兆瓦级激光的产生,以及如何维护天基激光可靠地工作。然而最大的挑战来自政治方面,试验和部署空间武器必需修改反弹道导弹条约,而这是俄罗斯,中国许多国家坚决反对的。

目前,正在试验的 Alpha 激光器-大型反射镜光学系统,仅仅是天基激光用于地面演示的技术,并未包括作战系统所需的先进技术。一种有效的激光武器应当能向目标发射一束所需摧毁相匹配的射束,从而获得最大的能量效率,这就提出了节能型激光器的概念。要减小靶斑尺寸必需采用更大的光学系统,更短波长的激光器和提高光束质量。未来设想的节能型天基激光武器包括 20m 的光学系统,1 μ m 波长的激光器和衍射极限光束。

5 地基激光反卫星武器

在高技术战争中空间是赢得战争胜利的先决条件,谁能控制空间,就意味着谁能控制地球。在 90 年代的海湾战争和科索沃战争中,美国大量使用和依靠各种类型的卫星,以及它们在战争中的重大作用有目共睹。美国的空间优势已成为冷战后美国以强凌弱和推行霸权主义的重要工具。

5.1 地基激光系统将执行“控制空间”的任务

基于自适应光学技术的地基激光系统将用来执行“控制空间”的任务,以对付敌方的低地球轨道卫星。美国空军一直在发展这样的地基激光反卫星技术,这项计划的中心是进行综合束控技术演示,并行开展的技术工作包括 COIL 装置,自动跟踪/照明激光器和卫星易损性评估,根据美国国防部文件,空军计划在 1999 年开始进行自适应光学和束控系统试验,先对 400km 高度的在轨卫星进行一次有限的束控试验,然后在 2001 年对更高轨道(1200km)的卫星作一次全面的束控演示试验^[21]。这些试验是先期技术演示计划的组成部分,以验证激光反卫星技术。该计划的目的是“研究和演示地基激光技术,以支持作出研制地基激光反卫星系统的决定”。计划于 2005 年建成控制空间的地基激光系统,具备初始作战能力。

空军综合束控演示试验将利用星火光学靶场的 3.5m 直径望远镜,以低功率的全系统演示地基激光与卫星交战头尾相接的所有束控功能。这台带有 941 单元自适应光学系统的望远镜,具有地基激光反卫星系统所需的光束控制和大气补偿能力,经补偿的峰值光强比未补偿的峰值光强提高了近百倍。自适应光学是远程激光武器中补偿大气湍流最关键的环节。

2001 年进行的全面束控演示试验中,将验证系统以下的能力:用光学方法捕获和跟踪目标,照明目标并补偿大气湍流,在目标上选择特定的瞄准点,对特定瞄准点发射激光并保持足以摧毁目标所需的时间。在试验中作为目标的侦察和通信卫星都不会被摧毁,但卫星上作为目标的探测器和通信天线将失效。

试验面临两大挑战。一是地基激光对补偿稠密大气效应的任务更加艰巨,受气候条件影响大。其二是精度问题,即照明激光器,跟踪传感器和处理器,要能以所需的精度 24h 对卫星进行主动跟踪。另外,作为地基反卫星激光器面临的一大技术挑战,COIL 必需改进热控和液体循环技术,以满足所需的长时间运行。

5.2 陆军改进白沙靶场试验系统,继续评估卫星对地基激光的易损性

美国陆军在 1997 年 10 月进行用激光照射 MSTF-3 卫星试验之后,一直在研究和分析收集到的数据,并可能要求再次进行试验。最近陆军空间和导弹防御司令部计划在 MIRACL 激光器的任务中增加“数据收集演练”,以评估美国卫星对地基激光的易损性。在他们给司令的报告中写道:在某些演练中将进行控制空间能力的模拟试验。通过模拟,利用假设的控制空间的能力进行指挥,控制和程序演练,但不进行实际的作战^[22]。

陆军正在通过 MIRACL 激光器和海石定向器(SLBD)的试验和改进,以提高系统的性能。1997 年的试验表明,将激光瞄准低地球轨道目标是非常困难的。在过去的两年里进行了一系列实验,主要是提高 SLBD 跟踪卫星的能力。试验的重点是如何把激光持续聚焦在空间目标上,甚至是目标的特定部位上。

对 SLBD 的改进是要使它能实施“二维圆锥扫描”瞄准技术,它包括使激光束在一个圆周内运动,直到目标的反射光返回地面,一旦探测到目标,SLBD 瞄准环就能使操作员把激光束准确定位在靶上,并保持所需的时间。陆军在白沙靶场用 SLBD,将低功率化学激光器产生的光束(32W)射向 550km 高的低功率大气补偿卫星,进行了“主动控制扫描瞄准线校正”和“SLBD 跟踪升级”两个系列的试验。试验证明二维圆锥扫描跟踪回路闭合获得了可靠的定位,并把焦斑保持在目标上。即使是在跟踪参数的边缘,也得到了稳定的控制回路性能。

6 舰载激光自卫武器

1 μm 波长的自由电子激光器(FEL)是具有最低大气吸收系数的激光器,它可大大缓解舰载激光武器碰到的热晕问题。其波长可调性和高功率运行的潜力,有希望满足海军未来舰载自卫武器系统的要求。而超导射频加速器驱动 FEL 有高的功率效率和加速梯度,能满足对舰载集装和原能力的限制。除此之外,FEL 消除了氟化氙化学激光器所用化合物带来的腐蚀性,并且 FEL 也为扩展海上作战提供了更多的选择。因此,海军已选择由超导射频加速器驱动 FEL,作为海军高能激光武器系统的激光器。

海军与能源部的托马斯杰斐逊国家加速器中心,正在联合发展兆瓦级舰载 FEL。目前,第一阶段的工作已结束,研制成功一台 3.1 μm 波长的自由电子激光器,其平均输出功率达到 1.7kW(原指标为 1kW),激光脉宽 1ps,重复频率 75MHz,。这一成果验证了超导 FEL 概念的功率定标律。海军与杰斐逊加速器中心已决定将这台 FEL 升级,到 2001 年~2002 年,1~10 μm 波长 FEL 的平均功率达到 10kW,0.2~1 μm 波长的 FEL 超过 1kW,波长调谐范围 0.2~60 μm 。最近伯克利国家实验室的研究人员设计了“点火反馈再生放大器”,将产生平均功率高达 200kW 的 FEL^[23]。

发展舰载兆瓦级 FEL 存在许多高难度的物理、工程和系统问题,因此,还有很长的路要走。研究人员在发展大功率武器用 FEL 的同时,也在开发小功率 FEL 的中间应用,如研制更适合通信用的激光器和检验硅片中的杂质。2000 年美国防预算拨款 1 千万美元给杰斐逊的 FEL 计划,研究利用 FEL 从地面向卫星传输能量。

参 考 文 献

11 Defense Systems Daily,2000-05-03(1)

12 Seigle G.Jane's Defense Weekly,1999-10-20(20)

晶体相位延迟测量的 $\lambda/4$ 波片法及理论研究

云茂金 李国华

(曲阜师范大学激光所,曲阜,273165)

摘要: 通过两束平面偏振光的合成推导出椭圆偏测量的理论基础,并由此得出用 $\lambda/4$ 波片测晶体的相位延迟时器件的设置及方法。

关键词: 偏振光 波片 相位延迟

Phase retardation measurement with $\lambda/4$ wave-plate

Yun Maojin , Li Guohua

(Laser Institute ,Qufu Normal University ,Qufu ,273165)

Abstract : The theory of ellipsometry is obtained through the composition of two polarized beams. Then the method for phase retardation measurement with $\lambda/4$ wave-plate is obtained.

Key words : polarized beam wave-plate phase retardation

引 言

在光学隔离、偏光干涉技术中,常需要精确测量晶体的相位延迟^[1]。目前,测量晶体相位延迟的方法有电光调制法^[2]、光学外差法及光谱测量法等。下面讨论用 $\lambda/4$ 波片测晶体的相位延迟,并给出测量原理及详细的理论分析。

1 原 理

两束频率相同、位相差恒定、振动方向相互垂直的平面偏振光可合成为椭圆偏振光,其偏振的态势决定于两平面偏振光的振幅和位相差。任一椭圆偏振光沿长短轴方向的位相差为 $\lambda/2$,若使之通过一快慢轴与椭圆长短轴重合的 $\lambda/4$ 波片,则此椭圆偏振光被补偿为一束线偏

- 13 Defense Systems Daily ,1999-09-08 (1)
- 14 Higgs C. SPIE ,1999 ;3706 :216
- 15 Johnson C. Airborne Laser Focus ,2000 ;6 (5) :2
- 16 Whitley G, Hess P. Inside the Air Force ,1997 ;19 :1
- 17 Defense Systems Daily , 2000-02-2 (1)
- 18 Vizard F. Popular Science , 1999 ;4 :57
- 19 Bender B. Jane 's Defense Weekly ,2000-03-22 (10)
- 20 Angeles L. AW & ST ,2000-05-01 (29)
- 21 Atkinson D. Defense Daily ,1999-01-27 (1)
- 22 Dupont G. Inside the Pentagon ,1999-12-16 (4)
- 23 Jones H. Laser Focus World ,1999 ;10 :77

* * *

作者简介:任国光,男,1938年出生。研究员。现从事激光技术发展策略研究工作。