

内部资料

高级工程技术人员研修班

论文集

(微光夜视、红外夜视、激光部分)

兵器工业总公司教育局、人劳局
兵器工程师进修学院 编印

一九九二年十一月

前 言

高新科技是当代科技竞争和经济竞争的制高点。以高新技术及其产业的研究与开发,带动常规技术和产品的技术进步,实现常规兵器高技术化,大力发展高技术附加值的民品,是兵器工业依靠科技发展战略的一项根本任务。

科技进步最关键的是人才问题。有计划地培养和造就大批科技专门人才,多渠道开发科技人员的创造力,为兵器工业科技和经济发展提供坚实的人才基础,开展继续教育是有效途径之一。

1991年10月6日至19日,在无锡举办的总公司首次高级工程技术人员研修班,以“现代光学与兵器技术发展”为选题,邀请了23位学科带头人和高层次科技骨干,请学部委员、南开大学校长母国光等著名学者、专家和有关领导做专题报告,然后分组论述各自的研修题目,开展咨询和交流。高研班为高层次科技人员提供了一个相互交流、相互切磋、相互学习、相互借鉴、相互提高的好机会,创造了一个活跃的认真的开展学术研究的良好环境,在学术上有所突破和创新。同时,也为今后进一步高质量、高水平、高效益地组织和开展高级技术研讨活动,推动兵器行业专业技术人员的继续教育探索了有益的经验,起到了示范作用。

为了推动兵器工业高新技术的发展,我们将高研班上专家们发表的研修报告汇编整理,其主要内容包括:微光、红外、激光等高新技术的发展趋势和水平,产品和部件的设计研制经验,发展应用光电技术的方向和建议。这些研修报告从不同技术领域或不同关键技术问题,结合当代最新理论发展,进行了较为深入地探讨和论证,提出了有价值的研究结论或方案。这些研究成果可供从事这些方面科研、技术工作的人员参考。

北京理工大学周立伟教授、魏光辉教授、兵科院总工程师欧阳刚高级工程师负责审编、统稿工作,付出了大量心血,一并表示感谢。

兵器工业总公司教育局、人劳局

兵器工程师进修学院

一九九二年十一月

目 录

一、综 述

1. 关于光电技术发展的几点意见 兵器科学研究院 欧阳刚 (1)

二、微光夜视部分

2. 夜视技术的进展 北京理工大学 周立伟 (9)
3. 二代象增强器和三代象增强器的性能和能见距离比较 国营二九八厂 田金生 (18)
4. 微光成像系统实现中远距离观测的研讨 国营五五九厂 王朝中 (30)
5. 微光 CCD 成像分析 二〇五研究所 张戊寅 (37)
6. 二代象增强器光反馈现象的分析 (详细摘要) 国营二九八厂 王近贤 (44)
7. 夜视成像系统中扫描制式的探讨 华东工学院 魏殿修 (46)
8. 微通道板真空体电阻与二代倒像微光管匹配关系的研究 国营五五九厂 程伟龄 (52)
9. 提高二代象增强器光电阴极性能的对策 (详细摘要) 国营五五九厂 魏清海 (61)
10. 微光夜视仪的目镜出瞳直径与焦距的选择 (详细摘要) 国营五五九厂 王承苾 (62)
11. 坦克第三代驾驶员夜视仪的方案 (详细摘要) 国营三一八厂 王汉钧 (63)

三、红外夜视部分

12. 运用专用集成技术推动兵器光电仪器的发展 二一四所 傅国强 (65)
13. 扫描器线性度与 MTF 测量方法的研究 二一一所 潘顺臣 (72)
14. 同步扫描器设计中的几个问题 (详细摘要) 二一一所 陈蔚涛 (77)

四、激光部分

15. 重视光电子技术的信息应用 北京理工大学 魏光辉 (79)
16. 高功率半导体激光及其在军事上的应用 长春光机学院 张兴德 (82)
17. 夜视—激光测距仪共孔径物镜设计 国营五五九厂 周仲贤 (86)
18. 研讨一种实验分析激光放大器工作状态的方法 国营五三〇八厂 梅继思 (91)
19. 军用中小功率 (能量) CO₂ 激光技术概况 二〇九所 封鸿渊 (95)
20. 微波激励 CO₂ 激光器 (详细摘要) 二〇九所 屈乾华 (97)
21. 关于军用 YAG 激光器系列划分的考虑 (详细摘要) 国营五三〇八厂 周天文 (99)

关于光电技术发展的几点意见

兵器科学研究院 欧阳刚

海湾战争以后,总公司领导曾多次明确的指出以高新技术改造常规兵器和兵器工业的任务。这个任务的提出,正在兵器行业引起愈来愈强烈的反响,广大干部、群众,尤其是科技人员受到很大鼓舞,也感到这是一种鞭策,大家都在为如何更好地落实这个任务而认真思考探索,献计献策。最近我们和一些专家,就光电技术如何为高新技术兵器的发展做出应有的贡献问题进行了研讨,提出了以下一些看法。

一、兵器行业应当重视光电技术的发展

用高新技术改造常规兵器的实质,就是在常规兵器中广泛的采用现代新技术革命的成果,尤其是采用电子信息技术的成果。武器系统中所包含的电子信息技术的内容,往往代表着这个武器系统的先进程度。而电子信息技术主要是由微电子技术(包括大规模集成电路技术、计算机技术等)和光电子技术(包括红外、激光、微光、可见光 CCD 等技术)两大部分组成。在一个武器系统中,光电子技术往往是构成武器的眼睛,而微电子技术则构成它的大脑和神经网络,只有光电子技术和微电子技术的密切配合、合理匹配,才能使一个武器具有完善的火控系统或者制导系统,使整个武器系统的效率和威力倍增。所以重视光电子技术(以下简称光电技术)的发展是发展高新技术兵器的必由之路。

光电技术又是我们兵器行业具有很大优势的领域。我们有六个专业研究所,一个专门的光机学院,而北工和华工都设有很强的光电专业系,我们还有 28 个光学厂,其中的大部分都已发展成为光电专业的工厂,我们从事光学和光电专业的职工人数约占本行业全国从业人数的一半。这样一支门类齐全,专业配套,厂、所、校结合,科研、试制、生产配套的光电技术力量,在国内是绝无仅有的,如果组织调配得好,是可以形成强大的力量,构成巨大的优势,不仅可以满足发展高新技术常规兵器的要求,而且还可以进入航空航天及海军等部门的光电技术领域。

但是我们在光电技术方面的优势并没有充分发挥出来,现在几乎在每一项光电技术方面,例如红外、激光、军用光纤等,我们都面临着一个或几个强有力的竞争对手。我们应尽快地认清当前竞争的严峻形势,重视光电技术的发展,否则我们将陷入更加被动的地位。

不论从高新技术的发展的需要来说,还是从保持和发展我们原有的技术优势,在当前的竞争中取胜,为我们众多的研究机构和工厂争取到更多的项目和生产任务来说,都必须抓紧光电技术

的发展。

二、重点发展哪些光电技术

根据海湾战争的启示,以及国内外当前的技术动态和我们自己的技术基础情况,我们提出:在光电技术领域应重点发展红外、激光、微光、光电对抗、光电综合、光电制导等六项技术,相应的发展专用集成电路、军用光纤和兵器惯性等三项技术。并提出了每项技术应发展的主要内容和途径。现就这些技术分述如下:

1. 红外技术

在红外技术方面,当前国内外重点发展的是热成像技术,以此作为发展夜视、侦察、制导等装备的重要手段。国外目前发展热成像技术,基本上有两大技术途径,一种是美国的发展路子:发展 HgCdTe (碲镉汞) 多元线列器件的并扫体制,以少元 (60 元以下的) 器件制作轻便型热像仪,供步兵使用。多元 (120 元, 180 元) 器件制作重型热像仪供车载、机载使用,下一步的发展主要是研制焦平面列阵的第二代热像仪凝视器件。形成了少元——多元——焦平面列阵这样一种技术途径。而英国走的却是另外一条路子,他们也发展 60 元以下的列阵器件,主要用于轻便型热像仪,但不发展多元 (120 元, 180 元) 的线列器件,而是发展 SpriTe 器件以代替复杂的 120 元和 180 元器件。英国也发展焦平面列阵器件,但是他们认为 HgCdTe 焦平面列阵器件在技术上难度太大,因而成本很高,短期内不易见效,而 SpriTe 器件本身尚有很大的发展潜力,因此同时应安排一个改进型 SpriTe 的研制工作。形成了一个少元——SpriTe——改进型 SpriTe——焦平面列阵,这样一种发展途径。

目前,我国的少元 (60 元以下) 器件和 SpriTe 器件已有基础,而 SpriTe 器件,尤其是 SpriTe 改进型器件,已可以取代甚至超过多元器件 (120 元, 180 元),技术也相对简单些,更适合我国的国情。因此,我们建议参考英国的做法,来安排我国热成像的技术发展途径,即不把多元器件作为发展的重点,而把更多的力量尽早的投入到焦平面列阵器件的研究上去,以实现一定跨度的超越。避免多元器件和 SpriTe 器件并举,相互竞争的局面。

走少元——SpriTe——改进型——焦平面列阵的路子,重点还应放在 SpriTe 和 SpriTe 改进型上,因为我们在 SpriTe 器件的研制方面有较好的技术基础,已形成一定的技术优势。

当前国外热成像技术发展上的另一个重要动向,是非制冷的热电焦平面器件的发展,美国已研制成功并应用在手持热像仪上,这是很值得我们重视的方向。

2. 激光技术

激光是我们在光电技术领域中发展得最为成熟的一项技术,现在常规兵器各主要武器系统对激光测距方面的各种要求,我们已基本上可以满足,对于 YAG 类的激光测距机,从材料、器件到

整机的主要技术关键皆已突破，并形成了一定的产业，产品也正在逐步系列化。

当前我们应逐步把激光研究工作的重点放到下一代激光测距机的研究上来，同时还要发展软破坏的战术激光武器。下一代的激光机的主要特点是：穿透战场烟雾的能力强，人眼安全，有一定的光电对抗能力。

为达到上述目的，目前应着重发展工作在两种波段的激光测距机，一种是工作在 10.6μ 波段的 CO_2 激光测距机，另一种是 1.54μ 波段的激光测距机。 10.6μ 波段的 CO_2 激光测距机，由于一般光学玻璃不能透过 10.6μ 的光波，而且其接受器件还需在低温下工作 (80°K)，因此只有和热像仪兼容时，才能充分发挥其效能，所以在当前应抓紧突破 CO_2 激光测距机基础技术的同时，应认真注意解决和热像仪的兼容问题。 1.54μ 的激光测距机在穿透战场烟雾方面和 10.6μ 波段相差不多，但是由于它可以采用一般光学玻璃，而且探测器不需要制冷，所以在应用上有更大的便利之处。

现在获得 1.54μ 波段的激光，有两种技术途径：一种是用喇曼平移的方法，使 YAG 激光器发出的 10.6μ 激光平移到 1.54μ 波段；另一种方法是用钕玻璃做成激光器件，直接产生 1.54μ 的激光，但是钕玻璃材料国内刚开始研制，而且 1.54μ 的调 Q 晶体目前还没有解决，所以短期内尚难突破。但是采用喇曼平移的方法，当前已获得较大的进展，我们现在已有可能做出高效率的体积小的喇曼平移激光器，不做大的变动，就可以直接替代现装备的激光测距机中的 YAG 器件，喇曼平移的激光器在技术上还可以实现两个波段 (1.06μ 和 1.54μ) 的跳频使用，以增强其光电对抗的能力。

采用 1.54μ 波段遇到的重要问题是没有接受 1.54μ 波段的雪崩式光电探测器，因而其接受效率就大大低于 1.06μ 波段的 YAG 激光，因此应抓紧研制 1.54μ 的雪崩式光电探测器。

当前激光技术发展的一个重要动向，就是用半导体激光器做泵浦源，泵浦固体激光器。由于半导体激光器的激光输出光谱，能够调整到和固体激光器件所需的光谱相对应，因之整个器件的光电转换效率就大大提高，比一般用氙灯泵浦的激光器约高 $10\sim 20$ 倍，这将使固体激光技术发生一个大的突破。

由上所述，激光测距技术方面我们应走的路子就比较清楚了，就是在发展 10.6μ 的 CO_2 激光测距技术的同时，应当抓紧 1.54μ 波段激光测距技术的研究，其中尤其要重视喇曼平移这种技术途径的发展，同时应把采用半导体激光泵浦固体激光器的技术尽快的加以突破（这是和有关单位展开竞争的项目），并将其应用到 1.54μ 激光测距机中去，这将使我们在军用测距技术上产生一个大的飞跃。

军用激光技术发展的另一个重要方面，是战术激光武器的发展。作为光电对抗的一个重要手段，能造成软破坏的战术激光武器，西方国家正在大力发展。英国曾在马岛战争中秘密使用过，美国则已发展成系列产品，并开始装备部队，对此我们不能等闲视之，必须相应的加以发展。而且发展这种技术，我们有较好的技术基础，第一代手持式激光致盲武器，我们早已研制成功，并能小批生产，国外战术激光武器中所采用的板条激光器，我们也早已开始研制，并取得了很大的进

展。因此在这项技术的研究上，我们不应放松，要再接再厉的继续发展，当前对此项目投资较少，困难较大，必须把力量集中在突破其中的关键技术上。

3. 微光技术

经过多年的努力，我们在微光技术方面已有很大的进展，现在我们已能批量生产一代微光管。二代微光管在采用国外通道板时也能批量生产，一、二代的微光仪器正在成系列的进行批量生产，并装备部队和进行外贸。“七五”期间在微光方面原定的任务是：“一代批生产，二代过关，三代起步”。前后二点要求都已达到，但中间的要求却没有完成。由于通道板国产化问题没能彻底解决，所以二代未能过关，近年来国际形势的变化，通道板的进口受到限制，二代管做不出来，影响了部队的装备和外贸出口。

“七五”期间由于通道板技术久攻不下，三代处于起步阶段进展不大，整个微光技术在科研方面处于相对停滞的状态。但这段时间在国际上微光技术却有了长足的进展，国外三代管已研制成功并批量生产，更引人注目的是超二代管也已研制成功和批量生产。超二代管的能见距离是一般二代管的 1.5 倍左右，与三代管比较相差不是太大，但它是一种二代管的改进型，只是把阴极灵敏度提高，把通道板的质量加以改善就可以达到，在工艺和结构上改动都不大，因而成本不高，技术难度也较小。而三代管由于要制作半导体的镓砷阴极，需要价格非常昂贵的 MOCVD 设备（我们还没有）和铟封台，技术难度很大，成本很高，近期难以突破。从费效比的观点来看，今后超二代的应用前景更大一些。三代管由于它具有一些其他优点，所以仍应加以发展，但是我们不能只发展三代，而忽视超二代的重大优点。因此我们的意见是：在发展三代的同时，“八五”期间开展超二代的研究，也就是在二代和三代之间插入一个超二代的研究。

“七五”期间有两个认识上的不足，可能是造成微光科研工作进展不大的一个原因。一个是认为：现在热成像技术的发展将会降低微光技术的应用价值，这种看法是不对的。微光管成本低，体积小，重量轻，在步兵武器上可以大量装备。随着超二代管和三代管的出现，微光技术已有可能解决中远距离的问题，这样就有可能满足坦克和低空防空武器的夜视要求。热成像技术虽然具有种种优点，但它价格昂贵，技术复杂，在我国只可能少量装备，因此大量的夜视装备问题，还是要靠微光技术来解决，所以微光始终是我们应当重点发展的技术。另一种观点是过早的认为二代管已基本过关和认为二代管已没有什么技术潜力可挖了，因此在“七五”期间对二代管的技术研究工作没有给以足够的重视，现在五年过去了，我们的二代管并未过关，又放松了对超二代管的研究，使我们和国外的差距进一步的扩大。

微光技术的另一个重要的发展动向，是微光 CCD 的发展，由于采用了微光 CCD 技术，就可以实现图象处理和目标的自动识别、跟踪等功能，从而大大扩展了微光夜视技术的应用范围。所以微光 CCD 也是我们“八五”期间应当重视的技术发展方向。

4. 光电综合技术

随着武器自行化、自动化程度的提高，以及所对付的目标的速度和机动性的增加，武器系统

对光电分系统提出的要求也越来越多和越高了,这种情况在目前正在研制的三代坦克、857 反导系统和四管 25 等项目中已反映出来。这些要求主要是:要求光电系统是全天候多功能的,即要求是昼夜合一,瞄准跟踪和测距合一的;要求在快速运动的载体中能正常工作,并保证精确射击或制导;要求能对快速目标进行精确的跟踪定位;要求能将所测得的目标参数快速传输给火控指挥系统。

为达到上述要求,我们需要将各自工作在不同波段的红外系统、激光系统、电视跟踪系统,以及可见光瞄准系统等有机的组合在一个综合的光电装备中。将这些系统组合在一起是一项复杂的技术,组合的好与差,组合的水平高与低,效果相差很大,有时会决定一个项目的成败。这里就引伸出一个新的技术概念,就是“光电综合技术”的概念,它包含有多光谱的共光路共窗口技术、稳像技术、快速精确跟踪技术、显示技术,以及总体装校技术等。

在光电综合技术方面我们兵器行业在国内具有一定的优势,但是光电综合技术是一个当前迫切需要解决的新的技术问题,有其专门的技术内涵,我们在这方面还仅仅是有了一个初始的起步,需要引起各方的重视,所以把它作为一个应当重点发展的技术专门提出来。

5. 光电对抗技术

在这次海湾战争中,电子战的重要性被突出的显示出来,引起了国内有关各界的充分注意。在光电对抗方面,由于伊拉克根本没有对抗的能力,多国部队也就没有采取什么光电对抗的手段,所以这次海湾战争没有发生什么真正意义上的光电对抗。但这绝不是说今后也不会发生光电对抗,现在战场上大量采用的各种光电设备必将导致光电对抗的到来。美国现在成系列的研制,并开始装备的各种进行软破坏的战术激光武器,就是针对今后战场上的各种光电传感器和人眼的。西方国家在光电对抗技术方面投入了大量的人力和物力,我们对此绝不能掉以轻心,现在我们已为部队提供了大量的光学和光电仪器,我们也有责任解决人眼和光电设备的防护和对抗问题。

过去我们也进行过一些光电对抗的单项技术研究,现在必须以系统的观点、全面地来考虑光电对抗的问题。应从预警、防护、被动干扰、主动干扰,以及使用激光武器进行压制等多方面进行研究,并把多种有关的技术恰当的组合起来构成不同用途的各种光电对抗系统,对不同的武器装备和目标进行光电防护。光电对抗技术作为一种新的技术问题,同样也还没有引起足够的重视,“八五”期间我们应当把这项技术抓起来。

6. 光电制导技术

光电制导技术实际上是光电技术在制导系统中的应用,在近程的战术导弹中,尤其是在我们所从事的反坦克导弹的研究工作中采用的几乎都是光电技术,所以我们应重视制导光电技术的研究。这方面当前的主要方向是图象制导,尤其是热成像制导,国外热成像制导主要采用两种方法,一种是采用长波焦平面列阵器件进行凝视成像的方法,另一种是用长波线列多元器件进行扫描成像的方法。根据我国的情况,由于长波焦平面列阵器件,在一定时期内难以突破,还是采用长波线列多元(60 元以下)器件实现的可能性较大,这里要解决的问题是研制一种精巧的能安装在导

引头中的微型扫描器，这在技术上虽然有一定的难度，但经过努力还是可以解决的，这比研制焦平面列阵器件在技术上的难度是小得多了。

解决热成像制导的另一个可能的途径就是采用非制冷的热电焦平面器件，这种器件在美国已研制成功，并开始应用。我们在这方面有一定的技术基础，应当开展这方面的研究工作，但当前实现可能性比较大的还是多元线列器件加扫描器的方案。

对于远程反坦克导弹(10KM 以上)来说，光纤制导是一种较好的选择，国际上这方面发展得很快，将图像制导或热成像制导的导引头和光纤制导技术结合起来，是一种成本较低而有效的制导方式。

以上就是我们认为在光电技术领域内应当发展的六项重点技术，其中光电综合技术和光电对抗技术两项，过去没有单独的提出过，现在随着技术的发展，有必要将他们作为一种专门技术单独提出来，以引起各方的重视和安排。

同时还须相应的发展以下三项技术：

1. 专用集成电路技术

随着高新技术兵器的发展，武器系统中电子技术的含量愈来愈增加，大量的采用通用集成电路和分离元件，将带来电子部件体积重量庞大、可靠性差等问题，因此在各种先进的武器系统中都采用专用集成电路，这样体积可大大的减小，可靠性也大为提高，而且保密性好，对于研制某些复杂的光电系统而言，能否采用专用的集成电路往往成为该系统成败的关键。

由于专用集成电路完全是为某种整机专门研制的，在技术上要和整机密切协调、匹配，电路中还包含着很多技术秘密和诀窍，而且技术复杂，产量很少，一般厂家多不愿意制作。所以国外的一些大公司都有自己的专用集成电路研制力量。在国内缺少专门为各行业服务的专用集成电路研制单位，即便有，也由于“部门所有，条块分割”等问题，不容易为我们提供及时和价格合理的服务。再加上有的部门在很多项目上是我们的竞争对手，就可能在专用集成电路的提供问题上卡我们。所以我们一定要重视我们自己专用集成电路力量的建设和发展，否则将处于很被动的地位。

2. 军用光纤技术

我们在军用光纤技术方面有一定的基础和优势，我们研制的反坦克导弹所需的高强度光纤，微光所用的光纤面板和通道板皆处于国内领先地位。同时光纤技术在研制传像束、光纤陀螺及其他光纤传感器等方面都有着广泛的用途和发展前景。所以光纤技术是兵器光电技术的重要配套技术，我们应当加以重视并使其相应的得到发展。

3. 兵器惯性技术

随着各类武器的自行化、自动化程度的提高，要求我们研制和提供各种稳向系统、平台系统、定向定位系统等惯性技术装备，以满足武器发展的需要。近年来在惯性技术领域，大量出现的光电惯性器件(激光陀螺，光纤陀螺，半球陀螺等)以其特有的高精度和高可靠性(因为没有回

转部件)等优点,正在一些重要的应用领域中取代机械陀螺。

光电陀螺的抗震性能好,更能适应兵器装备的要求,所以光电陀螺的发展和应用对兵器行业来说就更为迫切和重要。同时研制光电陀螺所采用的基础技术,即激光技术、光纤技术、光学薄膜技术和光学测试及加工技术等又恰恰是我们的专长。所以虽然我们在“七五”期间才开始起步研制光电陀螺,而且投资很少,但由于充分发挥了我们原有的技术特长,能很快赶上来,在光电惯性器件方面进入了国内先进行列。

所以不论从我们自己的需求方面,或是从充分发挥我们的技术优势方面来看,惯性技术都是我们应当相应发展的技术方向。

三、加强光电技术的科研管理

关于加强科研管理方面,可以讨论的问题很多,我们只想讨论一下关于提高领导机关科研决策水平和发挥兵器行业光电技术整体优势问题。

1. 提高领导机关的科研决策水平

光电技术是当代新技术革命中发展最为迅速、技术思想最为活跃的技术领域,要及时把握住它的动向,正确预测它的发展趋势,从而掌握好我们研究工作的发展方向是一件不容易的事。同时这个技术领域又是国内其他各部门与我们展开激烈竞争的热点,是我们受到压力最大,丢失阵地最多的地方。为了适应光电技术的发展和在竞争中取胜,很重要的一点就是要加强领导机关的科研管理水平,尤其是要提高科技决策的水平。

过去我们在搞计划、规划或做重大技术决策的时候,广泛征求下面的意见,听取各方面专家的意见做得比较充分,这是必要的。但自己作的分析工作却很少,所以拿不出领导机关自己的主见来,这种时候光听下面的意见是不够的,因为基层各单位从各自不同的角度提出的意见往往是不一致的,即使是一些专家的意见有时也会相差很大,这种时候领导机关缺乏主见,就会长期议而不决,或者最后用随大流、搞平衡折衷的方法来解决,这样容易造成决策不妥,甚至失误。

现在各军兵种和有些工业部门都建立起了自己的总体论证部,军方提出的一些型号项目,科工委提出的重大预研课题,大多是经过周密的调查和论证的,在一些争取项目的讨论会上,别的部门都是作了充分准备后去的,如果我们自己缺乏准备,对很多技术问题说不清楚,仅仅依靠基层单位的同志去谈,由于基层的同志对全局情况不了解,所以往往处于被动不利的地位。

由于领导机关的同志大多忙于各种行政事务工作,为了提高领导的科技决策能力,除了要求机关的同志加强学习,成为本行业的“明白人”以外,应当设立相应的总体论证机构,对有关光电技术的各个重要方面开展相应的调研和分析论证工作,成为领导机关有力的技术咨询和参谋机构。

2. 要发挥整体优势

我们兵器系统从事光电技术研究力量是很大的,如前所述,只要组织得好,完全可以形成一

个完整的光电技术科研、生产体系，但实际上这样一个体系并没有形成。由于“小而全”，“大而全”的思想作怪，以及其他种种原因，使我们的各研究单位之间协作配套的精神较差，而相互间争抓总，争项目，争经费的“竞争”意识很强，因而“内耗”严重。由于我们的整体优势没有发挥出来，所以在对外竞争中也容易失利。

要克服这种“内争”较多、“内耗”严重的情况，首先是领导机关要认识一致，如果领导机关本身对很多重大的技术决策、分工定点、项目安排、资源分配等问题认识不一致，那么领导机关的各个部门在自己的权力范围内就容易按自己的认识来处理问题进行管理，这样下面自然就会散乱起来。只要上面的认识一致，有统一的意见，做下面的工作就好做，就有可能把各单位的力量组织协调起来，发挥出我们的整体优势来。

夜视技术的进展

北京理工大学 周立伟

摘 要

作为开拓人眼视觉的夜视技术，在夜间观察、瞄准、驾驶、导航等军事应用中发挥着巨大的作用。自本世纪六十年代以来，夜视技术在利用夜间自然微光的反射辐射和利用场景中目标本身的热辐射二个方向上取得异常迅速的进展。本文将综述直视微光像增强技术、微光摄像技术与红外热成像技术的当代进展，分析各种技术的特点、技术途径、发展水平与前景以及未来的展望。

白天，根据晴空和有云的情况，景物照度在十万和数千勒克司之间，为我们眼睛视觉提供了良好的环境条件。在视网膜中，有着上亿个敏感神经，数百万个锥状细胞和毛细管，为我们提供非常清晰和有色彩的外界图像。视觉敏锐度主要受视网膜的显微结构以及衍射、像差等光学性能的限制。

晚上，在晴朗夜空下，照度下降到 10^{-3} 勒克司；在阴云夜空下，最小值约为 10^{-5} 勒克司。夜间光来源于星光或月亮所反射的阳光，以及直接来自大气层的大气辉光。在微光条件下，视网膜在一定时间间隔内所捕获的光子数过少，以致由于随机涨落造成的“光子噪声”限制了最小的可觉察的图像细节。为了从景物上接受到更多的光子，补偿信噪比的降低，人眼自动地调整各种参数，如放大眼睛瞳孔，眼睛完成暗适应，在视网膜更大的面积上提取积累信号，延长积累信号的时间等。但是，这些功能毕竟是有限的。此外，人眼还受到时间（此时），地点（此地）和辐射波长（可见光波段）的限制。

夜视技术是研究在夜间低照度的条件下，用扩展观察者视力的方法，以实现夜间隐蔽观察的一种技术。它采用光电子成像的方法来缓和和克服上述的限制，特别是克服人眼在低照度下以及有限光谱响应下的限制，以开拓人眼的视觉。

夜视技术始于本世纪三十年代，1934年，第一只主动红外变像管问世。它利用处于高真空中的银氧铯光阴极（S-1），将红外图像转换为电子像，再通过荧光屏，使电子像转换为人眼能察觉的光学图像。这一光子——电子相互转换的原理就是现代夜视仪的理论基础。但在使用红外变像管实现观察时，必须有一红外辐射装置“主动”照射目标。在第二次世界大战中和朝鲜战争中得到了初步应用。

主动红外夜视具有隐蔽性不可靠，易暴露自己，红外辐射源及供电装置笨重不便等缺点。人

们自然想到从二个方向发展：一是利用夜天自然微光的反射辐射，即研究被动微光技术，使微弱照度下的目标成为可见；另一是利用红外波段 $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\mu\text{m}$ 二个大气窗。即场景中物体本身的热辐射，研究被动红外技术使热目标可见。为此，近半个世纪来，在夜视领域，发展了直视微光像增强技术，微光摄像技术和红外热成像技术。

一、直视微光像增强技术

所谓“微光”是泛指夜间或低照度下微弱的光或能量低到不能引起视觉的光。直视微光的原理就是将在夜间或低照度下摄取的微弱的光学图像通过一个称为像增强器的器件转换为增强的光学图像，以实现夜间或低照度下的直接观察。它的突出优点是不需要人工的照明源，直接依靠夜天光辐射以“被动”方式成像，能观察到别人而不暴露自己。

自六十年代初发展微光夜视以来，其核心部件——像增强器的发展可分为三代，现将这三代技术及其进展概述如下：

1955年，A. Sommer 发现，若将 $\text{Na}_2\text{K S}_6$ 双碱光阴极进行处理，所形成的 $\text{Na}_2\text{K S}_6(\text{C}_s)$ 三碱光阴极 (S-20) 具有很高的灵敏度，且在可见光波段直到近红外有很好的光谱响应。这一新的光电发射体使低照度下图像增强成为可能。六十年代中期，以纤维光学面板作为输入、输出窗三级级联耦合的像增强器问世，这被称为第一代像增强器（一代管）。极微弱的目标图像经过纤维光学输入窗传输到光阴极上，同心球型的电子光学系统将自光阴极逸出的光电子加速并聚焦到荧光屏上，形成可见光的输出图像；图像通过纤维光学传输到下一级，经过三级增强，使一代管具有很高的增益，从而可以在微光下“被动”工作。这样，对于一个夜视望远镜，大口径物镜所捕获的光能通过像增强器进一步增大了投入人眼的光通量。由于视网膜上的照度被提高，所获得的信息流也就增高。眼睛局部地或全部地与视网神经相连接，提高了眼睛的分辨能力，使能看到比较清晰的外界。显然，这是对黑暗的一个重要突破。

第一代像增强器在轻重武器和装甲车辆的微光观察镜、瞄准镜以及远距离夜间观察装置上的应用，七十年代初已完成标准化工作，在解决一公里以内的夜间观测中获得了良好的效果。一代管的标准管型有 $\Phi 18/\Phi 18$ ， $\Phi 25/\Phi 25$ ， $\Phi 40/\Phi 40$ ， $\Phi 18/\Phi 7$ ， $\Phi 18/\Phi 11$ ……等。性能典型值：光阴极灵敏度为 $300\mu\text{A}\cdot\text{lm}^{-1}$ ，850nm 处的辐射灵敏度为 $20\text{mA}\cdot\text{W}^{-1}$ ，亮度增益为 $2\times 10^4\sim 3\times 10^4\text{cdm}^{-2}\text{lx}^{-1}$ ，鉴别率为 35lpmm^{-1} 。

一代管现时有二个改进：一是畸变校正，这就需要在阳极和屏之间插入一个低电位甚至负电位的电极，从而使电子向轴偏折，达到校正畸变的目的；二是强光防护，这是在光阴极和阴极套筒之间加一电阻，当受到强光时，使电子光学系统散焦，以免荧光屏灼伤。

三级级联的一代管在低照度下应用具有增益高，成像清晰，不用照明源等优点，但太重太笨，防强光能力差。为了克服这一缺点，人们经过多年的探索，于七十年代初成功地研制了能实现电子倍增的二维元件——微通道板 (MCP)。它由上百万个紧密排列空芯通道管所组成，通道芯径间

距约 $12\mu\text{m}$ ，长径比为 $40\sim 60$ 。通道板的两个端面镀镍。构成输入和输出电极。通道的内壁具有较高的二次发射特性，入射到通道的初始电子在电场作用下使激发出来的二次电子依次倍增，从而在输出端获得很高的增益。

利用 MCP 的像管称为第二代像增强器（二代管）。它具有二种聚焦形式：一是锐聚焦，它类似单级一代管，但在管子的荧光屏前安置一微通道板，称为二代倒像管；二是近贴聚焦，微通道板被贴近放置在光阴极和荧光屏之间，荧光屏制在纤维光学面板或光纤扭像器上，称为二代薄片管。

二代薄片管典型结构为 $\Phi 18/\Phi 18$ ， $\Phi 25/\Phi 25$ ，亮度增益约 $5\times 10^3\text{Cdm}^{-2}\text{lx}^{-1}$ （对 $\Phi 18/\Phi 18$ ） $\sim 1.7\times 10^4\text{Cdm}^{-2}\text{lx}^{-1}$ （对 $\Phi 25/\Phi 25$ ），鉴别率约 30lpmm^{-1} 。二代倒像管除 $\Phi 18/\Phi 18$ ， $\Phi 25/\Phi 25$ 的管型外，尚有 $\Phi 20/\Phi 30$ 的结构。从性能上来说，二代倒像管要更好一些，但二代薄片管更短更小。

与三级级联的一代管相比较，二代管的优点是体积小，长度仅级联一代管的 $1/5\sim 1/3$ ，重量轻，畸变小，鉴别率高，能防强光和自动亮度控制。因此，自问世以来发展很快，部分已取代三级级联一代管。

上述一代管和二代管所用的 $\text{Na}_2\text{K S}_b(\text{Cs})$ 光阴极是常规的光阴极。对于这样的光阴极，电子从价带逸出到真空形成光电发射所需的最小能量为 $E_g + E_a$ ，称为光电阈值；这里 E_a ——电子亲和势，乃是导带底与真空能级之间的能量差， E_g ——禁带宽度。1965 年，Scheer 和 Van laar 发现，对一简并掺杂型 GaAs 表面以铯和氧进行处理，使真空能级位于体中导带底之下，电子亲和势为零或负值，便得到负电子亲和势（NEA）光阴极，其光电阈值 $= E_g$ 。

NEA GaAs 光阴极的灵敏度很高，大部分光谱区波段都比 S-1 和 S-20 光阴极要高好多倍，在近红外波段有很高的响应，量子效率比 S-1 光阴极高几十倍，暗电流仅是 S-1 光阴极的千分之一。

第三代像增强器（三代管）是在二代薄片管的基础上，将 $\text{Na}_2\text{K S}_b(\text{Cs})$ 三碱光阴极置换为 GaAs NEA 光阴极，此 GaAs 光阴极的制作过程是极为繁复的。首先，利用液相外延（LpE）或金属有机物汽相外延（MOVPE）在 $[100]$ GaAs 基底上生长 $\text{AlGaAs}-\text{CaAs}$ 双异质结结构。此双异质结然后热封到蓝宝石窗上。通过膨胀系数调节到尽可能与 GaAs 和蓝宝石窗匹配。热封后，进行一系列化学处理，将 GaAs 基底和第一层 GaAlAs 去除掉。这样的结构然后引入专门的超高真空装置中，对 GaAs 激活面进行热清洁，随后进行 Cs、O 激活，以达到负电子亲和势。

三代管的典型结构只有 $\Phi 18/\Phi 18$ ，目前商品水平为：灵敏度 $1000\mu\text{AIm}^{-1}$ ， 850nm 处辐射灵敏度 100mA W^{-1} ，亮度增益 $1\times 10^4\text{Cdm}^{-2}\text{lx}^{-1}$ ，鉴别率 36lpmm^{-1} 。

三代管具有高灵敏度，高鉴别率，宽光谱响应，高传递特性和长寿命等优点，故自八十年代初不少技术发达国家竞相研制。在美国，到八十年代中期，便有装备三代管的航空夜视成像系统（ANVIS）和 AN/PVS-7 夜视眼镜，将 ANVIS（三代管）和 AN/PVS-5 夜视眼镜（二代管）相比较，在 10^{-3}lx 夜间照度下，视距约提高一倍。

应该指出，制作三代管涉及超高真空技术，表面物理技术，大面积高质量的单晶和复杂的外

延生长技术,难度是相当大的,因而管子的价格也是相当昂贵的。

那么,有没有可能在二代管的各部件如光阴极、微通道板、荧光屏以及结构上挖掘潜力,改进性能,从而大幅度提高二代管水平,增大观察视距呢?答案是肯定的。

如所周知,像增强器的性能是以在低照度下提高探测与识别距离的能力来评价的。探测与识别距离正比于输出信噪比(S/N)输出和调制传递函数(MTF)的乘积。

在带有微通道板的像管中,增大(S/N)输出有赖于提高光阴极的白光灵敏度和改善微通板的质量以减小噪声因数。对于三代管,它有很高的白光灵敏度,且红外区有很高的光谱响应。但是,微通道板为了要与NEA光阴极相容,不得不进行很剧烈的清洁处理。这种处理减小了二次发射系数,从而增大了噪声因数。其次,在三代管的微通道板上镀上一层 Al_2O_3 或 SiO_2 离子隔离膜。这层薄膜固然保护三代管的稳定性和可靠性,但俘获了来自光阴极的低能电子,且后向反射了部分电子,降低了微通道板的电子收集率,从而使噪声因数有明显的增加。这样,噪声因数的增大大部分地抵消了三代管光阴极的高灵敏度。

对于二代管,可以通过以下途径来提高光阴极的灵敏度,减小微通道板的噪声和改善整管的MTF。

提高三碱光阴极的灵敏度,可通过改变传统先形成 K_3Sb 的方法而先形成 Na_3Sb ,然后蒸K和Sb使之形成有很强的晶体结构的 Na_2KSb ,并增大 Na_2KSb (Cs)光阴极中光电子的逸出长度,且使它具有适当厚度,通过测反射率法和光电流监测法相结合监控光阴极制作。在实践中,三碱光阴极的灵敏度已由 $300\mu AIm^{-1}$ 提高到 $700\mu AIm^{-1}$ 。

减小噪声因数,可以通过增大MCP的开口面积比,提高电子的首次撞击的二次发射系数以及撞击它的倍增过程的统计特性,开口面积比可增大到80%以上。此外,在通道输入端涂上高二次发射系数的材料(MgO , CsI , KBr 等),也有助于降低噪声因数。二代管的上述改进使(S/N)输出接近于三代管。

改善MTF的途径,可以用“牛眼”玻璃入射窗代替纤维光学输入窗,减小光阴极至MCP输入面的间距,减小MCP的孔径间距(由 $12\mu m$ 降到 $7\mu m$),减MCP输出面至荧光屏的间距。此外,最好将纤维光学输出窗代替光纤扭像器,并在纤维光学输出窗上制备镶嵌屏,即将荧光粉颗粒沉淀到单个光纤的空腔内,使由荧光粉激发的光子限制在相应的光学纤维内传输。通过这些措施,鉴别率将能提高到 $50lpmm^{-1}$ 。

采取以上提高输出信噪比,提高传函等措施,可以预期在新的二代管上能取得较大的突破。

为了进一步解决在极低微光下的应用,出现了杂交管的方案,它是以二代薄片管或三代管作为第一级,单级一代管作为第二级相耦合的组合式像管,称为杂交管。它的优点是可以获得很高的增益,并有可能减小微通道板的增益以寻求 S/N 与增益之间的最佳折衷,而鉴别率比二代薄片管仅下降10%。这一方案充分运用各自的优点,使增益和信噪比充分发挥出来。

近年来,在实际应用中,常采用使像管选通的方案。一个选通管(或选通像强器)是在保持正常工作的高电压的同时,在选通电极上加一相当低的电压变化,使光阻极的电流截止而实现选

通的。这种管子实际上乃是像增强与快速电光快门的组合，它的特点是大大扩大了器件的动态范围，并具有抗模糊和捕捉快速事件的附加优点。一个选通单级一代管可将原来的动态范围($10^{-3} \sim 10^{-1} \text{lx}$)提高二个数量级($10^{-3} \sim 10^{-1} \text{lx}$)，而一个选通杂交管则能提高四个数量级(由 $10^{-6} \sim 1 \text{lx}$ 到 $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{lx}$)。

对于直视微光像增强器，一代，二代，三代以及杂交管能解决夜间观察距离一公里以内的问题，可以根据不同的需要进行选择。在尺寸、重量和局部亮度控制并不十分重要的场合，一代管通常优于二代管。二代管由于小而轻，能防强光并有自动亮度控制，通常用于夜视头盔镜，夜视瞄准镜等场合。杂交管通常优于二代倒像管和薄片管，与三级级联的一代管相当，但其重量轻，尺寸小并有局部亮度控制。三代管在性能上虽有很大的改进，但工艺复杂，价格昂贵，看来在价格降下来之前，在我国大量应用是很少可能的。此外，三代管无倒像管的形式，高增益的三代管只有通过杂交管获得。从技术上的可能性和价格上的合理性来说，未来十年间，发展高灵敏度、高鉴别率的二代管及其与一代管的组合看来是解决夜视实际应用的较好选择。

二、微光摄像技术

由于军事、天文学与航空航天科学的需要，作为间接观察的微光摄像技术，近二十年来得到了极大的发展。

微光摄像通常采用视频信号输出，因而可以实现远距离多点同时观察，观察者不必进入危险的侦察区；通过电路的信息处理，可以加强图像对比；通过改变扫描速度，根据不同观察条件的要求变更积累时间，可获得最适宜的视觉增益。这一系列优点使其形成一个新的重要的夜视技术领域，日益广泛地用于指挥哨所、军用车辆、直升飞机和舰船上。

微光摄像具有二条途径：一是真空摄像器件，如硅增强靶管(SIT)和分流直像管(Isocon)等；另一是固体摄像器件，如像增强电荷耦合器件(II/CCD)和电子轰击电荷耦合器件(EB-CCD)等。

硅增强靶管(SIT)的靶面采用极薄的硅片上形成紧密排列的二极管列阵。当输入面光阴极逸出的光电子被加速到上万电子伏轰击到靶面上，引起电子——空穴对的游离，随后空穴被扫描电子束所中和，信号便由靶的信号板上读出。SIT的主要优点是高增益、低滞后，并在强光照下具有低晕光的能力。此外，结构简单，价格较低廉。当在SIT上耦合一像增强管，或为ISIT，可在极低微光下工作，分辨率达700电视线。分流直像管(Isocon)是当今用于低照度下摄像最佳的真空器件。它利用电子束上靶被返回的散射电子构成信号，具有高灵敏度，低滞后，高分辨率，大动态范围的特点。但结构复杂，价格较高，使用上受到限制。若在Isocon上耦合一像增强管，成为IIsocon，则可应用于 $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{lx}$ 极低照度的场合，分辨率达1000电视线。

应该指出，上述两种真空微光摄像器件虽仍有应用，但CCD用于微光摄像发展异常迅速，显示出巨大的前景。

鉴于一般的 CCD 摄像,只能在景物照度 1lx 以上才能工作,解决微光摄像的方案之一便是将像增强管耦合到 CCD 上,形成 II/CCD。耦合的方式通常有纤维光锥耦合和将图像缩小直接与纤维光学耦合,使图像尺寸与 CCD 幅面相适应。

对于许多应用,单级缩小倍率的一代管与 CCD 耦合,能提供很吸引人的方案,其入射光照可下降二个数量级;若在前面再加一个二代薄片管,形成杂交管结构,则此 II/CCD 可用于景物照度低于 10^{-4}lx 的场合。若再在管子内加选通,则景物照度的动态范围可达 $10^{-5}\sim 10^{+3}\text{lx}$ 。二代管、三代管通过缩小倍率的光锥与 CCD 相耦合,亦能形成高性能的 II/CCD 系统。其总尺寸小,结构紧凑,且微通道板能抗过照防护。不过,三代管的应用增加了费用,且目前的光锥有遮掩杂散光、畸变与斑点等毛病。

固体微光摄像另一个方案是将 CCD 作为电子图像探测器直接置于像管内取代荧光屏,电子直接轰击 CCD,CCD 提供视频信号。通常采用背面轰击 CCD 灵敏面的途径,以避免集成的 Mos 电路的绝缘层中的能量损失与充电效应。背面轰击的 CCD 要进行减薄,以便获得高分辨率,高探测效率和高稳定性。此外,要求封装到管子中与管子和光阴极的制造工艺相兼容。EB-CCD 可在景物照度 10^{-4}lx 下工作,分辨率为 500 电视线。

1991 年,日本研制一种具有高灵敏度,高分辨率的电子轰击固体摄像器件,它类似 EB-CCD,不过 CCD 以非晶硅/放大的 Mos 成像器 (asi/AMI) 代替。asi/AMI 的结构由 $\text{Al}-\text{Si}_3\text{N}_4$ ——asi:H; B——asi:H; N——AMI 各层所组成。当管子工作时,高能光电子穿过 Al 层和 Si_3N_4 层,轰击 asi:H; B 层,产生众多的电子-空穴对,电子向着加正电压的 Al 电极方向运动,空穴向着 AMI 方向运动,通过 asi:H; N 层到达 AMI 由此读出信号电流。AMI 乃是 XY 寻址型的固体像敏器,在 $2/3$ 吋幅面中有 $510\text{H}\times 490\text{V}$ 像素,目前在 10^{-2}lx 的景物照度下,分辨率约 380 电视线。

应该指出,目前在天文学、高能物理、光谱学、空间科学中获得广泛应用的成像光子计数探测系统乃是微光摄像技术进一步的发展。这一系统具有探测单个光子或带电粒子的能力、高空间分辨能力以及实时成像与接着的图像分析的能力。

从结构上来说,光子计数探测系统类似于 II/CCD 或 EB-CCD。不过管子中采用二块堆积 (Chevron 结构),三块堆积 (Z 形结构) 或弯曲通道 (C 板) 的微通道板,以获得更高的增益。其次,由 MCP 输出的电子的读出,除了用 CCD 作为探测元件外,还有采用位置灵敏器件 (PSD) 和多阳极微通道列阵 (MAMA) 等多种高分辨率的电子读出系统,以实现单光子的计数探测,这里就不细述了。

随着高分辨率电视 (HDTV) 的进展,采用真空摄像的途径将在靶面研究上有突破;另外,随着成像光子计数探测技术的进展,CCD 和各类电子读出系统日新月异的发展;看来,在微光下,真空摄像与固体摄像之间的竞争将会出现新的局面。

三、红外热成像技术

红外热成像技术实质上是一种波长转换技术,即把红外辐射能转换为可见光的技术,利用景