

DAQI HUANJING

大气环境

与

微波激光武器

YU WEIBO JIGUANG WUQI

陈学中
编著

解放军出版社

大气环境与微波激光武器

陈学中 编著

解 放 军 出 版 社

(军内教材 注意保存)

京新登字 117 号

书 名:大气环境与微波激光武器

作 者:陈学中

责任编辑:李世纲 赵玉婵

装帧设计:朱宏华

出版发行:解放军出版社

社 址:北京市西城区地安门西大街 40 号 邮编:100035

印 刷:北京国防印刷厂

开 本:787 毫米 × 1092 毫米 1/16

字 数:424 千

印 张:17.5

版 次:2006 年 11 月第 1 版

印 次:2006 年 11 月(北京)第 1 次印刷

统一书号:55065·2767

(如有印装错误,请寄军队教材音像部调换)

出版说明

本书是由总参大气环境研究所陈学中编写的专著,供机关、部队及教学、科研单位使用参考。

总参气象水文局

2006年2月

前 言

20 世纪 80 年代以后,在世界范围内陆续发生了几场局部战争,其突出特点是交战的一方或双方使用了多种高技术武器装备,高技术战争初见端倪。特别是 90 年代初的海湾战争,以美国为首的多国部队大量使用了高技术武器装备,使战场条件、作战手段和对抗方式发生了根本性的变化,标志着高技术战争已经作为现代战争的基本样式登上了历史舞台。这场大规模高技术局部战争立即引起了世界各国的政治家、军事家以及科技界的极大关注,迫使人们更新战争观念,审度其军事理论,改变其军队编制,调整其军事策略。在这场高技术战争中,也使我们看到了大气环境对高技术武器装备的作战和使用具有不可忽视的影响,它们受大气环境的制约在某些方面超过了常规武器。这就为我们军事气象工作者提出了新的课题,增强了我们对高技术战争中大气环境问题研究的紧迫感。作为一项初步工作,我们编写了一本《大气环境与高技术战争》的书,归纳了大气环境对高技术武器装备和作战指挥影响的方方面面。虽然在该书中也涉及到了激光制导武器等问题,但由于材料的限制,或者从根本上说是武器发展阶段的限制,没有作为独立章节阐述大气环境对微波与激光武器的影响。经过十多年的发展,我们陆续看到了一些材料。特别是布什当选美国总统后,宣布单方退出反导条约,大量增加军费,加速发展其反导系统。使我们预感到微波与激光武器在未来的若干年内将会有有一个较快的发展,美国将其装备部队并在战争中大量使用已为期不远。作者虽年逾古稀,已退休多年,但仍认为有必要进一步收集资料编写一本小册子,阐述大气环境对微波与激光武器的影响。这一方面是对《大气环境与高技术战争》一书的一种补充,另一方面也是为了唤起军事气象工作者的注意,加强对这方面的研究,以适应未来军事气象保障的需要。

编写本书的初衷,一是使广大指战员了解大气环境的影响,在使用这些武器系统和作战指挥时,趋利避害,从中得到益处;二是使武器的研制人员从中获取大气环境方面的知识,在其工作中尽可能考虑大气

环境因素,改进设计提高武器的作战性能;三是使军事气象人员深入研究有关的大气环境问题,更好地作好军事气象保障工作。为此,作者要求自己尽可能作到物理概念清楚,数学模型准确,图表资料丰富,使其对广大指战员、武器研制人员、军事气象工作人员以及有关的教学和科研人员均有一定的参考价值。但是,由于涉及学科多,专业性强,许多方面超出了作者的专业范围,因此,说些外行话,出现这样或那样的错误,是在所难免的,敬请读者谅解并加以指正。

本书第一章对微波与激光武器及其发展前景作了简要介绍。第二章阐述微波与激光在大气中传输的一些基本理论,揭示大气环境影响的物理机制,建立评估大气环境对微波与激光武器影响所需的数学模型,为第三章打下基础。第三章,深入分析了大气环境对微波与激光武器产生影响的几个主要方面,并尽可能通过个例计算定量说明影响的程度。第四章,从大气环境参数探测、气候分析和天气预报三方面阐述了对微波、激光武器进行气象保障中的一些问题,并且对有些问题作者还提出了如何解决的想法和建议。

作者将编写本书的想法提出后,得到总参气象水文局和总参大气环境研究所领导的大力支持,立即作为临时课题列入科研计划,使之在编写经费和出版方面得到了保证,作者在此提出真诚的感谢。作者对所引文献的作者也深表谢意,如果没有他们的工作做基础,完成本书的编写是不可能的。

编著者
2006年1月

目 录

第一章 微波与激光武器概述	(1)
第一节 微波与激光	(1)
第二节 微波武器	(7)
第三节 激光武器	(14)
第二章 微波与激光的大气传输	(29)
第一节 大气分层与成分	(29)
第二节 大气对微波和激光的折射	(32)
第三节 大气气体分子对激光和微波的吸收	(35)
第四节 大气分子、气溶胶粒子和沉降物对激光和微波的散射	(49)
第五节 微波与激光在湍流大气中的传输	(85)
第六节 强激光与微波在大气传输中的非线性效应	(99)
第三章 大气环境对微波与激光武器的影响	(112)
第一节 大气环境对捕获、跟踪和瞄准系统(ATP)的影响	(112)
第二节 大气环境对微波武器的影响	(142)
第三节 大气环境对激光武器的影响	(167)
第四章 气象保障中的若干问题	(190)
第一节 大气环境参数的探测问题	(190)
第二节 大气环境参数的气候分析问题	(205)
第三节 大气环境参数的预报问题	(233)
参考文献	(263)

第一章 微波与激光武器概述

微波与激光武器同属于定向能武器(DEW)。也就是说,它们都是依靠发射以光速或近于光速传输的能束来摧毁目标或使之失效的武器。它们将在防空、反导与电子战中发挥重要作用,日益受到各军事大国的重视。

第一节 微波与激光

微波与激光本质上都是电磁波,只是二者所属的波段不同。电磁波的频率可低至千分之几赫(10^{-3} Hz),高者可达若干亿赫(10^{10} Hz),相应的波长则从 10^{11} m 至 10^{-20} m,表 1.1 给出了电磁波谱。微波属于无线电波段,其频率为 1GHz ~ 300GHz,波长为 1mm ~ 1000mm,涵盖了分米波、厘米波和毫米波,即特高频(UHF)、超高频(SHF)和极高频(EHF)三个频段。激光的频率比微波高得多,波长短得多,其频率为 10^3 GHz ~ 10^{10} GHz,波长为 10^{-1} mm ~ 10^{-8} mm,即涵盖了红外线、可见光、紫外线和 X 射线四个波段。

表 1.1 电磁波谱($\lambda = 10^N$ m, $f = 10^M$ Hz)^[1]

名称	宇宙射线	γ 射线	X 射线	紫外线	可见光	红外线	无线电波
<i>N</i>	< -16	-16 ~ -11	-11 ~ -8	-8 ~ -7	-7 ~ -6	-6 ~ -3	-3 ~ 11
<i>M</i>	> 24	24 ~ 19	19 ~ 16	16 ~ 15	15 ~ 14	14 ~ 11	11 ~ -3

一、微波

虽然在自然界存在的电磁波中包含了各种频率的波,但是人工获取高频微波则是 20 世纪 30 年代的事。1937 年生产第一支具有共振腔结构的速调管,将其与适当的电子学线路连接便可产生高频微波。上世纪 60 年代研制出了正交场放大器,70 年代出现了固体微波源。到了 70 年代末 80 年代初,人们根据等离子体物理学中波 - 粒相互作用的理论,研制出了新的微波源,才使获取峰值功率超过 100MW 的高功率微波成为可能。今天人们已可生产峰值功率超过 15GW 的高功率微波器件,这就为高功率微波武器的发展打下了基础。

高功率微波武器要求微波波源峰值功率高,平均功率大。峰值功率 P_p 和平均功率 P_{AV} 之间满足关系:

$$P_{AV} = P_p \tau f_R \tag{1.1}$$

其中 τ 为脉冲的时间宽度, f_R 为脉冲的重复频率,即单位时间内发出的脉冲数目。峰值功率代表了脉冲的强度,峰值功率高表示武器冲劲大。平均功率代表单位时间内发出的能量,平均功率大表示武器有足够的恒劲。只有冲劲又大,恒劲又足,才能将目标彻底摧毁。要做到这一

点,除了提高峰值功率 P_p 外,还要增加脉冲的宽度 τ ,和提高发射频率 f_R 。然而, P_p 和 τ 又是互相制约的。当进一步提高 P_p 时,脉冲的宽度 τ 反而会变窄,出现所谓的短接现象,使加大脉冲的能量 $E = P_p \tau$ 受到了限制。此外,高功率微波的能量 E ,是经过能量转换装置将初级能源(电能或化学能)转换成电磁辐射能的。这种转换效率的高低对于武器系统也是重要的。大多数情况下这种功率的转换效率只有 10% ~ 20%,也有报导在一定条件下曾达到 40% ~ 50%,可见潜力是很大的。如果效率进一步提高,就可生产出尺寸小、重量轻、威力大的武器来。

在(1.1)式中, τf_R 称为占空因子。因为 f_R 等于脉冲重复周期 T_R 的倒数,故占空因子等于脉冲的时间宽度 τ 与重复周期 T_R 之比。对于常规微波源,占空因子的变化范围为 $10^0 \sim 10^{-4}$,而高功率微波源的占空因子却为 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 。可见为了提高平均功率,增大占空因子是大有可为的。然而,从目前的技术水平来看,尽管对高功率微波源的重复运转作了大量研究,进展却不太理想。

峰值功率和微波频率 f 平方的乘积 $P_p f^2$ 是表征高功率微波源性能的另一重要因子,称为微波源的性能因子。此因子表示从固定尺寸天线上发射出的微波信号经聚焦发射到某一距离的能力。图 1.1 给出各种微波源器件峰值功率随频率 f 的变化情况。从图上可以看出,当频率低于 10GHz 时,峰值功率随频率没有明显变化。但当频率高于 10GHz 后,峰值功率随频率的升高而明显降低。

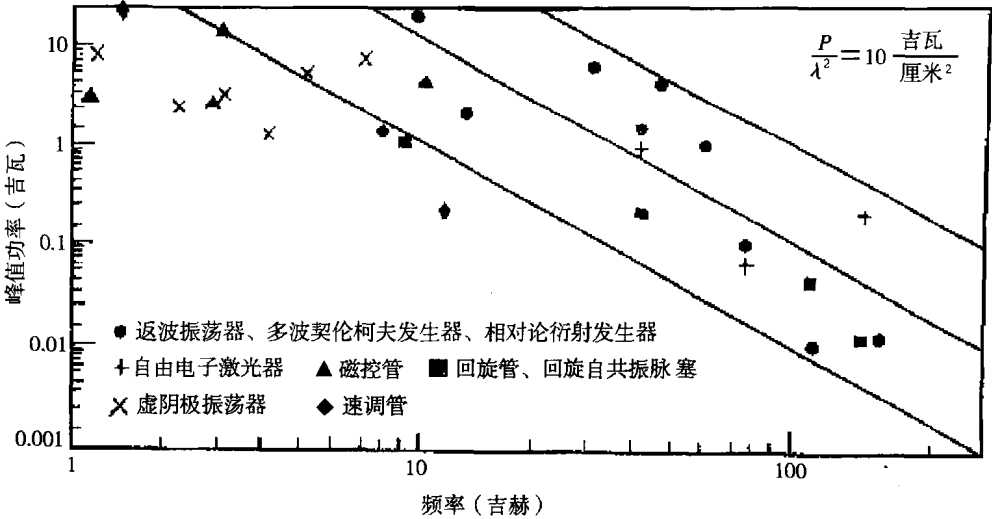


图 1.1 脉冲源峰值功率随频率的变化关系^[2]

图 1.2 给出了近半个世纪因子 $P_p f^2$ 随着技术的改进而提高的情况。从 20 世纪 40 年代到 70 年代的 30 年中,随着普通器件的发展 $P_p f^2$ 提高了三个数量级。但 70 年代以后普通器件的潜力已尽, $P_p f^2$ 的提高趋于平缓。也正当这时,出现了相对论器件,才使得 $P_p f^2$ 得以大幅度提高。在这后 20 年里 $P_p f^2$ 同样提高了三个数量级,并且还保持着继续提高的势头。

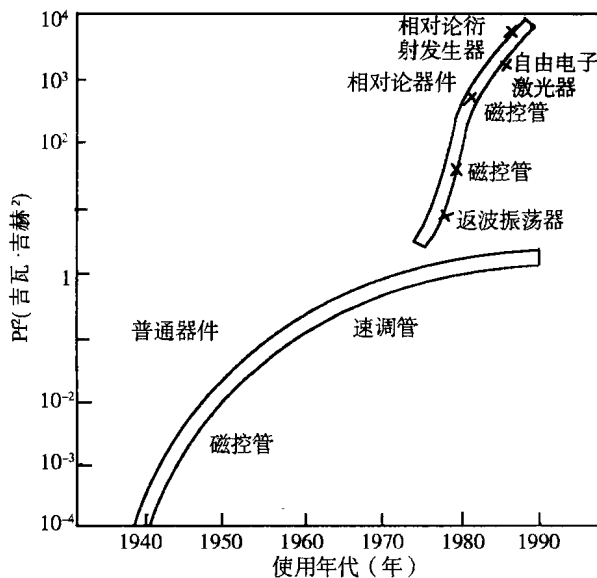


图 1.2 随着微波器件的发展,性能因子 P_{eff}^2 提高的情况^[2]

二、激光

激光的英文名称为 *Laser*。意思是受激辐射放大得到的光,中文译作激光,早期也曾音译为“莱塞”或“雷射”。激光是 20 世纪 60 年代人类发明创造的伟大成果之一,现在已应用于各个领域,翻开了人类科技发展的新篇章。

要了解激光的发射机理,首先必须明白光的受激辐射概念。根据光的量子学说,光是一种以光速 c 运动的光子流。光子和其他基本粒子一样,具有能量、动量和质量。光子的粒子属性是和其波动属性紧紧联系在一起的。光子的能量 ϵ 由其频率 ν 决定

$$\epsilon = h\nu \quad (1.2)$$

其中 $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, 称为普朗克常数。光子还具有运动质量 m ,

$$m = \frac{\epsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} \quad (1.3)$$

光子的静止质量为零。光子可以和构成物质的原子相互作用。原子是由中间的原子核和外层的电子组成的。原子核带正电荷,电子带负电荷,核对电子的库仑吸引力作为电子绕核运动的向心力,使电子绕核不停地运动。但是电子只能在若干种可能的轨道上运动,而不是任意的。并且这些可能轨道之间有一定的距离,电子要么在这一轨道上运行,要么在那一轨道上运行,在两个轨道之间是不能停留的。也就是说电子改变轨道是跳跃式的,而不是由一个轨道连续滑行到另一个轨道。当电子在不同的轨道上运动时,原子就处于不同的状态,或称原子具有不同的能级。在稳定情况下,电子总是沿着使原子处于最低能级的轨道上运行,这种状态称为原子的基态。只有在受到外来激发作用时,原子才有可能改变其基态,由较低的能级上升到较高的能级。当原子处于高能级时是不稳定的,这种状态称为激发态。为了简单起见,我们仅考虑原子的两个能级 E_1 和 E_2 。

$$E_2 - E_1 = h\nu \quad (1.4)$$

图 1.3 给出了光子和原子相互作用的三种过程。

其一,自发辐射。左边表示一个处于高能级 E_2 的原子,自发地向低能级 E_1 跃迁后由右边表示,在此跃迁过程中发射出一个能量为 $E_2 - E_1 = h\nu$ 的光子。原子自发跃迁发出的光波,称为自发辐射。

其二,受激吸收。如图的左边所示,处于低能级 E_1 的原子,在频率为 ν 的辐射场的激励下,吸收了一个能量为 $h\nu$ 的光子,向能级 E_2 跃迁,如右边所示。这一过程称为原子受激吸收,此时 $E_2 = E_1 + h\nu$ 。

其三,受激辐射。本来就处于高能级 E_2 的原子,在频率为 ν 的辐射场的激励下向低能级 E_1 跃迁,如左边所示。跃迁后放出一个光子 $h\nu$,使入射光得到放大,如右边所示。受激跃迁发出的光称为受激辐射。

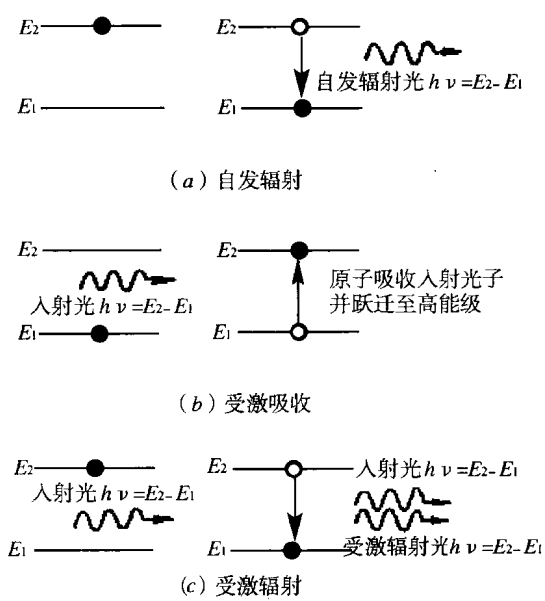


图 1.3 光子和原子的相互作用^[3]

在上述三种过程中,自发跃迁是与受激跃迁本质不同的两种跃迁过程。前者只与原子的性质有关,而与辐射场无关;后者不仅与原子的性质有关,而且还与辐射场有关。受激吸收过程由于吸收了辐射场的光子,使辐射场衰减;而受激辐射,原子不但没有吸收辐射场的光子,反而在辐射场的激励下放出光子,使辐射场得到放大。很显然,入射光与原子系统相互作用的结果使入射光衰减还是加强,取决于两种过程哪一种占优势。如果受激吸收过程占优势,则入射光通过与原子系统相互作用后将受到衰减;反之,如果受激辐射占优势,入射光将得到加强。假定在所研究的原子系统中,单位体积内处于两个能级 E_1 和 E_2 的原子数分别为 n_1 和 n_2 ,在入射光的激励下,由能级 E_1 跃迁到 E_2 的概率和由 E_2 跃迁到 E_1 的概率分别为 P_{12} 和 P_{21} ,则单位时间内由 E_1 能级跃迁到 E_2 能级的原子数目为 $n_1 P_{12}$,而由 E_2 能级跃迁到 E_1 能级的原子数目为 $n_2 P_{21}$ 。如果 $n_1 P_{12} > n_2 P_{21}$,则受激吸收占优势,入射光将被衰减。反之,如果 $n_2 P_{21} > n_1 P_{12}$,则受激辐射占优势,入射光将被放大。研究的结果表明,由低能级 E_1 跃迁到高能级 E_2 的概率 P_{12} 和由高能级 E_2 跃迁到低能级 E_1 的概率 P_{21} 是相等的,即 $P_{12} = P_{21}$ 。这样,如果

$n_2 > n_1$, 则入射光经过和原子系统作用后将得到放大。这一点对于激光来说,是非常重要的。

在一个由大量原子、分子或离子组成的系统中,在热平衡状态下,粒子的能级分布服从玻耳兹曼分布律:

$$n = n_0 e^{-E/kT} \tag{1.5}$$

其中 n_0 为单位体积中粒子的总数, n 为单位体积中处于能级为 E 的粒子数, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, 称为玻耳兹曼常数, T 为系统的热平衡温度。图 1.4 为(1.5)式的图像。由图中可以看出,在热平衡状态下, $E_2 > E_1$ 时,总有 $n_2 < n_1$ 。然而,要想使入射光与原子系统作用后得到放大,必须使 $n_2 > n_1$ 。也就是说,必须使粒子数按能级取与玻耳兹曼定律成相反的反分布。这种分布称为反转分布。

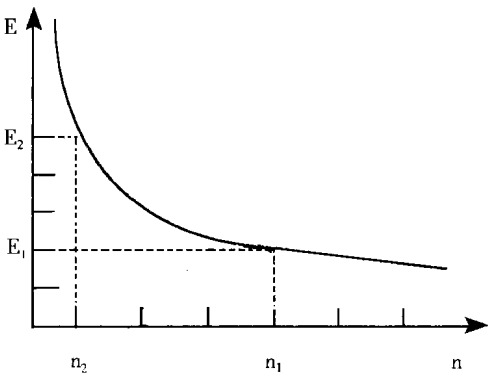
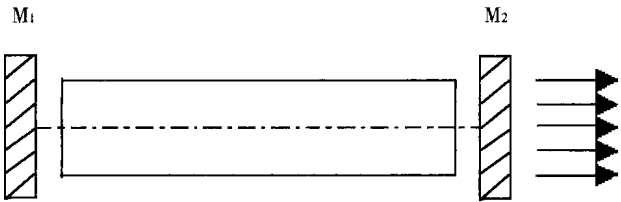


图 1.4 热平衡状态下原子系统中能级的分布

很显然,要想得到粒子数的反转分布,靠自然的热平衡状态是不行的,必须用某种外部力量对系统进行激励。目前已掌握了多种使粒子系统发生反转分布的方法。对不同的粒子系统(也称工作物质)采用不同的激励方法。常用的激励方法有光激励、电激励、化学激励和核激励等。研究还表明,并非任何粒子系统经过激励都能产生粒子数反转分布的。只有那些能级结构符合一定条件的粒子系统,经过适当激励才能得到所需的反转分布。具有反转分布的系统称为激活介质。激光器就是对能够激活的介质采用适当的激励方法进行激励来获取激光的。激活介质可以是气体、液体和固体,相应的激光器叫气体激光器、液体激光器和固体激光器。

仅仅有了粒子数反转分布的激活介质没有光学谐振腔,仍然得不到所需的激光。因为激活介质总是有一定的大小的,原始自发辐射和大量的感应辐射,总会达到介质的边界,并穿过边界,一去不复返,也就形不成强的受激辐射。这时自发辐射要比受激辐射强得多,整个介质发出的光仍然是普通的光,而不是激光。为了解决这个问题,在激活介质长轴的两端装上两个互相平行且垂直于介质轴线的反光镜,构成激光器的谐振腔,如图 1.5 所示。其中左面 M_1 反射镜的反射率接近 100%, 右面 M_2 反射镜的反射率稍低,约为 98%。 M_1 称为全反射镜, M_2 称为部分反射镜。装上这两个反射镜之后,情况就大不一样。这时激活介质中沿轴线传播的自发辐射和感应辐射,在边界处遇到反射镜的反射又返回介质内部,并感应更多处于激发态的



M_1 ——全反射镜, M_2 ——部分反射镜

图 1.5 激光器谐振腔的示意图

原子,使之释放出更多的光子。如此往返,使沿轴向传播的光不断加强,一部分通过 M_2 传播出来,形成我们所需要的激光。在这个过程中,那些运动方向不与轴线平行的光子,便会通过介质的边界逃逸出去,使输出的光线比谱通光具有更好的方向性。

除此之外,谐振腔还对激光的频率起限制作用。根据谐振腔理论,谐振腔的共振频率为

$$\nu = mc/2nL \quad (1.6)$$

其中 m 为一正整数, c 为光速, n 为折射率, L 为腔长,即两个反射镜之间的轴向距离。只有与共振频率相匹配的光,才能在腔内形成往返振荡,这样就使输出的激光具有极好的单色性。所以,方向性强,单色性好,是激光的两大优点。这两大优点决定了激光具有极好的空间相干性和时间相干性,并且可以达到很高的亮度。

激光的方向性和空间相干性。所谓空间相干性,系指来自同一波源的两列以上的光波在空间相遇时相互干涉的性质。比如用两支手电筒发出的光照射在同一个地方时,该处的亮度就会比用一支手电筒照射时亮一倍,并且亮度的分布也比较均匀,这说明手电筒发出的光是各不相干的,或者说两束光在空间上没有发生相干。但是若用两束同种光源的激光,比如让一束氦氖激光透过两个平行狭缝,照射在缝后适当距离的屏幕上,情况就不同了。这时幕上就可以看到明暗相间的条纹,这是二者相互干涉的结果。两列或两列以上的光波要发生相干,必须二者的频率相同、振动方向相同、位相相同或位相差恒定。这对普通光来说是很难达到的,因为普通光源各个发光的粒子(原子、分子或离子)相互独立,各发各的光,相互没有联系或联系很小。但激光就不同了,在激光中各发光中心相互联系,所发出的光不仅频率相同,而且偏振相同,并具有相同的相位或恒定的相位差。

激光的空间相干性与其方向性或发散程度之间具有如下关系:

$$l_c = \frac{\lambda}{\Delta\theta} \quad (1.7)$$

其中 l_c 为相干尺度, λ 为波长, $\Delta\theta$ 为光束发散角。普通光源发光粒子是向全方位发射的,而激光中不同原子发出的光子具有大致相同的方向,光束的发散角极小,例如氦氖激光发散角仅有 10^{-4} rad。波长相同的普通光源发出的光的相干尺度仅为氦氖激光的 10^5 分之一。

激光的方向性强,光束发散角很小,当光束照射到很远的目标上后光斑的直径仍然不会很大。例如,一台较好的探照灯,其光束的发散角约 $20'$,当其光束转播到 1000m 后,光斑直径可达 10m;但与探照灯具有相同孔径的激光束,发散角仅有 $0.12''$,传播同样距离后其光斑直径尚不足 1cm。

激光的单色性和时间相干性。光的颜色是由其波长或频率决定的,激光的频率范围很小,就说明其单色性很好。光的时间相干性系指光速在传播过程中保持一定相位差的最大时间。此时间称为相干时间,由频率的分布决定:

$$t_c = \frac{1}{\Delta\nu} \quad (1.8)$$

其中 t_c 为相干时间, $\Delta\nu$ 为光束的频率弥散。普通光源所发出的光由于是大量互不相关的原子自发辐射产生的,其频率弥散宽度可达 10^{14} Hz,由(1.8)式可知其相干时间是极短的。而一束激光中的光子来自受激辐射,互相之间的频率是近乎相等的,整个光束频率变化的范围很小。例如,采取适当的稳频措施后,氦氖激光的频率弥散宽度可达 2Hz。由此可见,激光的相干时间可达普通光源的兆亿倍(10^{14})。

激光的高亮度。由于激光的方向性极强,其能量可集中在很窄的光束中传播,在目标处可获得极强的亮度。再加上其单色性好,很容易通过聚焦获得更细的光束,使亮度进一步加强。目前强激光器的输出功率可达若干 MW,其亮度可达太阳亮度的几十亿倍。

目前已发现的激光工作物质和激励方法有很多种,不同的工作物质和激励方法可产生不同波长的激光,已经可以产生出数千条不同波长的激光。这些激光谱线比较稀疏地散布在电磁波的整个光频波段。在远红外区($25\mu\text{m} \sim 1000\mu\text{m}$)、中红外区($2.5\mu\text{m} \sim 25\mu\text{m}$)、近红外区($0.76\mu\text{m} \sim 2.5\mu\text{m}$)、可见光区($0.4\mu\text{m} \sim 0.76\mu\text{m}$)、紫外区($0.005\mu\text{m} \sim 0.4\mu\text{m}$)以及 X 射线区($0.000001\mu\text{m} \sim 0.005\mu\text{m}$)皆有激光谱线的踪影。对应的激光器也常常被命名为红外激光器、可见光激光器、紫外线激光器以及 X 射线激光器等。

第二节 微波武器

这里所说的微波武器系指高功率微波武器,即利用定向发射的高功率微波束摧毁敌方电子设备或杀伤敌方作战人员的一种定向能武器。高功率微波武器的峰值功率一般都在 1GW 以上,有的高达 $10^1\text{GW} \sim 10^2\text{GW}$,其频率在 $1\text{GHz} \sim 300\text{GHz}$ 之间。这里之所以提出 1GW 作界线是为了将高功率微波武器与各种干扰机区别开来。因为有的书上也把功率 $1\text{MW} \sim 10^2\text{MW}$ 的所谓超级干扰机列为高功率微波武器。当然这样区分,人为性很大。

高功率微波武器主要分为单脉冲式微波弹和可重复运行的微波武器系统两种类型。

一、单脉冲式微波弹

单脉冲式微波弹又分为常规炸药激励和核爆炸激励两种,当前研究的重点是常规炸药激励的微波弹。为了方便,我们将以常规炸药激励的单脉冲式微波弹称为高功率微波弹,这是我们介绍的重点;将以核爆炸激励的微波弹称为核电磁脉冲武器,对此仅作简要介绍。

(一)核电磁脉冲武器

在很早各国进行核试验时就已发现,伴随核爆炸而产生的电磁波脉冲会对电子系统或电器设备造成很大的破坏。在电子战日益被人重视的今天,人们自然会想到把核爆炸作为电子战武器来使用。

核电磁脉冲的产生是核爆炸时发出的射线与大气作用的结果。当核弹头在大气层外爆炸时,除产生具有极大杀伤性的冲击波,热辐射和放射性物质外,还有很强的 γ 射线和 X 射线。其中 γ 射线是产生电磁脉冲的根源。在爆炸后产生的 γ 射线从爆点辐射出后,与 $20\text{km} \sim 40\text{km}$ 处较稠密的大气层相遇,和空气分子与原子碰撞引起康普顿反应,产生很强的发射康普顿电子束流,此电子束流在地球磁场的作用下回转,并呈螺旋状前进,从而产生电磁脉冲辐射。通常将 γ 射线与空气分子和原子碰撞发生康普顿反应的区域称作发生源区,将电磁脉冲从发生源区向外扩散传播的区域称为辐射源区。

核爆炸产生的电磁脉冲与雷电现象有许多相似之处,图 1.6 和表 1.2 分别以图形和数据给出了二者的比较。

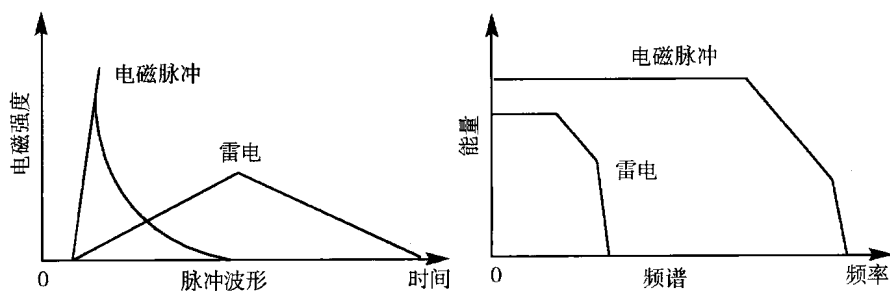


图 1.6 核爆炸电磁脉冲与雷电的比较^[5]

表 1.2 大气层外核爆炸产生的电磁脉冲与闪电脉冲的主要数据比较^[5]

项 目	大气层外核爆炸电磁脉冲	闪电脉冲(直接落雷)
上升时间	8ns	5 μ s
持续时间	200ns	10 μ s
电场强度	50kV/m	15kV/m
磁场强度	100A/m	-
电 流	100A/m ²	10 ⁵ A 以上
能 量	4 $\times$ 10 ⁸ J	10 ⁶ J
频率范围	10kHz ~ 100MHz	10MHz 以下

从图和表中可以看出,核爆炸电磁脉冲的电场强度急速上升,上升到峰值约需 8ns。然后急速下降,持续时间约 200ns。而闪电的脉冲,上升时间为 5 μ s,相对来说要慢得多,其持续时间为 10 μ s,也长得多。从强度上看,核爆炸电磁脉冲电场强度为 50kV/m,比闪电脉冲的也要强。核爆炸电磁脉冲的频谱比较宽,从 10kHz 到 100MHz,而闪电脉冲的频谱比较窄而且频率在 10MHz 以下。

发生源区和辐射源区电磁脉冲的强度和作用范围,取决于爆炸高度和爆炸当量。爆炸通常区分为大气层外、大气层中、近地面、地面和地下几种情况,表 1.3 给出了不同爆高对地面设备的电磁脉冲强度和作用面积。可以看出,对于地面设备来说,以大气层外爆炸辐射区的脉冲强度最强,作用范围也最广。

表 1.3 影响地面设备的电磁脉冲强度与面积^[5]

	发生源区		辐射源区	
	强 度	面积(km ²)	强 度	面积(km ²)
大气层外	-	-	强	10 ⁶
大气层	-	-	-	-
近地面	弱~强	10	弱	50
地 面	强	10	弱	50
地 下	强	< 1	-	-

(二)高功率微波弹

受核爆炸电磁脉冲的启示并随着对电磁脉冲破坏机理的认识不断深化,人们便考虑能否用炸弹的爆炸代替核爆炸产生局部的强电磁脉冲,因为核武器不但不能随意使用而且成本很高。经过近些年的研究,已经取得了很大进展,有可能进入 21 世纪后在电子战中得到广泛的应用。它是通过在炸弹、炮弹或导弹的战斗部上加上微波弹装置和辐射天线构成的。图 1.7 给出了高功率微波弹的示意图。其基本原理就是利用炸药爆炸压缩磁通,将炸药的能量转化为电能,再经过粒一波转换用的特殊电磁波导结构,将电能转换成电子束流,再转换成微波,最后由天线发射出去。主要由以下三大部分组成:

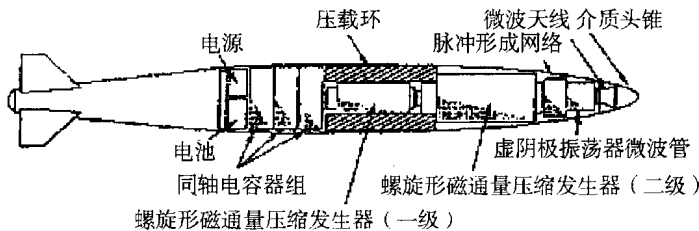


图 1.7 高功率微波弹示意图^[2]

一是磁通量压缩发生器。磁通量压缩发生器由初级能源、磁场线圈(定子)以及炸药和装炸药的金属套管(转子)组成。初级能源由电池和电容组件构成,可在电感器中产生数十安培的初始电流。定子是绕在金属套管(转子)外面的螺旋型电感线圈,当初始电流输入后,可在电感线圈与金属套管之间形成强电场。当炸药爆炸时电感器为克服磁力而发生物理变形,电感量迅速降低,从而释放出储存在电感器磁场中的能量,产生一个持续时间极短的高功率脉冲。

二是脉冲形成网络。脉冲形成网络的作用是将磁通量压缩器输出的低阻抗调制匹配为高阻抗,将低电压变换成高电压,并将脉冲的波形整制成前沿快速上升的陡化脉冲,将其送入真空二极管。

三是产生电子束流的真空二极管和虚阴极振荡器微波管。整制后的脉冲送入真空二极管后,产生相对论电子束,激励虚阴极振荡器产生微波,最后通过天线将高功率微波发射出去。

高功率微波弹虽是一次性的,不能重复使用,但由于成本低、体积小、重量轻、便于携带和投扔以及威力大等优点,受到各国的重视。

二、可重复运行的微波武器系统

可重复运行的微波武器系统,由于其可重复使用,并可连续多次攻击同一个目标等优点,已成为高功率微波武器的主体,今后我们将其简称为高功率微波武器。高功率微波武器比较典型的要算前苏联研制的用于防空的地基高功率微波发射系统了。它由电源车、高功率微波源车、对空监视雷达和控制指挥车构成。其峰值功率为 1GW,杀伤距离 1km ~ 10km。在 1km 和 10km 处的目标上功率密度分别可达到 $400\text{W}/\text{cm}^2$ 和 $4\text{W}/\text{cm}^2$ 。它不仅能使敌方武器系统的电子设备失效,杀伤操作人员,而且具有抗反辐射导弹的能力。美国 AAI 公司也研制了一种 MTD 装置。它的整个系统装在一个组件中,其中有初级功率源、充电电源、MARX 发生器、磁体

电源及磁体、磁控管、输出波导、天线及诊断系统等。整个系统装在拖车上,峰值功率 700MW,微波频率 3GHz ~ 5GHz,脉宽 50ns,重复频率 2Hz ~ 10Hz。

(一)高功率微波武器原理

高功率微波武器的工作原理如图 1.8 所示,一般包括初级能源、高功率脉冲源、强流电子束发生器、高功率微波源以及定向辐射天线五个部分。

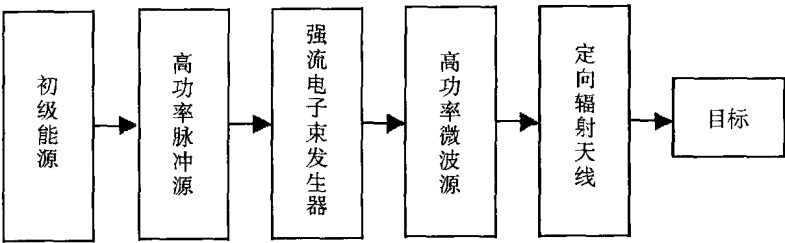


图 1.8 高功率微波武器原理图

初级能源可以是电能,也可以是化学能,其功能是为整个系统提供能源。高功率脉冲源的任务是将初级能源提供的大量能量进行“调节”,在时间上将其压缩为更高的功率,以便提供具有极高峰值功率和低占空系数的脉冲功率能流。这种高峰值脉冲能流加到由真空二极管构成的强流电子束发生器后,在其阴 - 阳极之间形成很强的电场,从而形成一束极强的电子束流。电子束流进入高功率微波源的电磁波导结构,电子被激发产生辐射,形成高功率微波输出。最后由定向天线发射到目标上去。

(二)高功率微波武器的破坏效应

高功率微波武器的破坏效应系指其高功率微波作用在各种目标上产生的破坏效果。这里所说的目标,可以是各种物体、武器系统、通信指挥系统、电子设备以及各种参战人员等。就破坏的物理机制而言,破坏效应包括电效应、热效应和生物效应。电效应是指高功率微波作用在金属表面或金属导线上产生感应电流或电压,对电子元器件产生的效应。例如,可以造成电路中器件状态反转、性能下降或被击穿等。热效应是指高功率微波对介质加热使其温度升高而产生的破坏效果。例如,可以烧毁器件和半导体的节,使之出现热力二次击穿等。生物效应是指高功率微波与生物体相互作用所产生的物理和生理效应。

高功率微波武器对各种系统的破坏是通过高功率微波耦合实现的。耦合的途径分“前门”耦合与“后门”耦合两种。“前门”耦合是指高功率微波通过系统的天线和观测孔等进入系统的耦合,“后门”耦合是指高功率微波通过系统的孔隙、电缆接头和焊缝等进入系统的耦合。高功率微波一旦进入系统之后,便会在其电缆、波导、电线或空间中传播。在电缆、波导和电线中传播的情况下,微波的能量通过它们到达元器件。如果能量达到或超过一定程度便会产生破坏。在空间传播的情况下,由于金属腔体及腔内的各种部件对微波进行反射,形成极为复杂的微波场,与腔体内的线路板或元器件相互耦合,对元器件产生破坏。特别是当微波的波长与元器件的特征尺寸相近时,可能引起共振,使破坏程度加剧。

通常 $0.01\mu\text{W}/\text{cm}^2 \sim 1\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的弱微波能量,通过前门耦合能冲击电路系统和触发电路,