

# 强脉冲激光在军事应用中的位置

中国科学院力学研究所 付裕寿

本文从激光发展的重大课题出发,指出了强脉冲激光在军事应用中的重要位置。对强脉冲激光与材料相互作用的破坏机理,研究现状及与连续波激光输出比较所显示的优越性进行了分析讨论。

## 一、激光发展的重大课题

几乎是从激光诞生的同时,一些重大的课题就相应地提出,这些重大课题就包括“死光”武器和激光核聚变。

就激光武器而论,它的历史几乎和激光器本身的历史一样长,它的发展大体可分为几个阶段:

(1) 1961—1968年。当1960年Maiman根据诺贝尔奖金获得者Townes, Басов, Прохоров等人把受激发射理论推广到光学领域的理论,制成了世界上第一台红宝石激光器后,人们很自然地与幻想中的“死光”武器联系起来。1961年美国高级研究计划局提出了第一个激光杀伤武器的设想,当时,激光器的输出功率还只有毫瓦量级,所以也只是设想而已。但是,国防部就下决心投资研制激光武器,积极筹备,小规模地研究和探索,重点放在固体激光器上。不过很快发现固体激光器作为武器应用没有什么前途。

(2) 1968年—1973年。1963年, Avco Everett 实验室利用气动技术在 $10.6$ 微米波段的 $\text{CO}_2$ 激光输出功率突破了六千瓦的水平。美国军界立即制定了代号“第八张牌”的绝密计划。该计划从战术武器研制入手,最终目标是实现战略反导武器。这一计划的结果之一是在1972以前在凯特兰空军基地用6千瓦的气动激光点燃两英里以外的木板。跟踪系统亦相当好,精确打中一英里外安在20英尺高木杆末端摆动着的靶面,据报导,也曾成功地打下无人驾驶的飞机。[1, 2]

气动激光器在70年代初已达到十几千瓦的水平,但由于本身的效率低以及大气传输和体积庞大等问题,经过试验,证明作为战略反导武器是不大合用的器件,于是解密报导,除了个别单位尚进行一些新的气动技术探讨(例如,后混式)外,美国国防部已将器件封存。

(3) 73年以后进入第三阶段。在这期间国防部成立了高能激光评议组来协调三军和高级研究计划局的激光研究。一方面加强基础试验研究。另一方面探索新的途径。当时,根据实际情况,决定集中主要力量由TRW公司进行新的化学激光的研究。这导致了七八年四月份在南加里福尼亚州的圣胡安·卡皮斯特罗诺,拉莫,伍尔得里奇公司的防卫宇宙试验设施

中，利用氟化氙连续化学激光器成功地摧毁了一枚高速飞行的反坦克导弹。

对于这一成功的看法是不同的。一种看法认为这次成功是“终于出现了强有力的破坏武器”。因而应该毫无疑问地大力发展化学激光武器的研制，实现战略反导，这是激光反导武器的方向；另一种看法为：化学激光摧毁反坦克导弹的成功是令人鼓舞的，但这只是由实验室阶段向前迈进了一步，由于化学激光和气动CO<sub>2</sub>激光器一样，有其固有的弱点，如受大气传输距离和气候条件的限制。据推测，这一次成功的报导有可能如70年代初期，美国解密宣布气动激光器已输出十多万瓦进行静态打靶实验一样，表明氟化氙化学连续波激光作为地基的战略反导武器的实战应用已无多大希望。因为历史已经证明，美国解密宣布气动激光是由于它作为地基战略反导没有成功希望。但当时曾给人一种错觉。

根据报导判断，去年美国进行的试验激光功率已达几十万瓦的水平<sup>[3]</sup>，作用距离为1—2公里的范围<sup>[5]</sup>，据文献<sup>[3]</sup>照片判断，破坏的是导弹的脆弱部分（头部）。试验结果，证明使用的休斯公司的跟踪寻的系统是十分成功的。

经过一个时期的试验，美国有关人士指出，化学激光的优越性并不像以前想像的那样大。

苏联在激光武器的发展中也投入了大量的技术力量。由二名因研究激光而获得诺贝尔奖金者统一领导，对气动激光，电子束控制的CO<sub>2</sub>激光以及化学激光器都进行了大量的工作，进展大体与美国相当。

激光武器发展到现在已到第四阶段。这一阶段的特点是：一方面对现有的系统考虑提高效率并使其轻型化和小型化以便设计成战术实战武器和在空间首先得到应用，另一方面积极探索新的激光器件并重点转向对脉冲激光器件研讨。

## 二、脉冲激光器件被关注的原因

先前，所以化学连续波激光成为优选者，一个重要的原因是破坏机理为较简单的热效应。但是，实验发现，对连续波激光输出而言，由于大气吸收和热晕现象将消耗掉大部分能量。以每公里大气吸收10%<sup>[4]</sup>计，则10公里将损失掉5%以上的能量。在到达目标时，由于大多数金属反射掉5%以上的能量，输出100万瓦的激光为例，只被目标吸收万瓦量级的激光能。

由于光束的固有发散性，即是接衍射极限，十公里的聚焦斑点直径最低也要10厘米以上。若在目标上要求功率密度达到 $10^5$ 瓦/厘米<sup>2</sup>使材料熔化，所吸收的功率应是数千万瓦，再考虑到大气吸收及材料的反射，激光器输出的功率要几亿甚至几十亿瓦。这一数字是惊人的，同时也是很难达到的。所以，Klass<sup>[4]</sup>在评价连续激光器时指出，这种激光对付靠近地球表面的战斗机和导弹，破坏距离相对来说是短的，只有一公里左右。对于今后相当长的年代，现有的高能连续激光器件，预计最大的杀伤距离也只能是几公里。为了扩大杀伤距离，就必须对脉冲类型的器件予以重视。

显然，如果输出一万焦耳的CO<sub>2</sub>激光器（据报导洛斯、阿拉莫斯在70年完成，为核聚变用）被材料吸收1/10计，若脉宽为0.1微秒，到达10公里的目标上，则功率密度到 $2 \times 10^7$ 瓦/厘米<sup>2</sup>以上，一样高的功率密度足以汽化任何材料。这种脉冲输出也是现实所能做到的。

最近的研究表明，脉冲器件的优点是多方面的。它首先表现在比连续波类型的激光有较

好的传输特性。例如，热弥散是由于空气被连续激光辐射加热而使光束散焦，在某些情况下，若不加校正，将会浪费90%的光束能量[5]。用脉冲激光时热弥散可以减轻。脉冲足够短，空气没有足够的时间变热而造成严重散焦。若相继脉冲时间间隔有一定时间，跟踪目标时光束移动，使后继脉冲经过冷空气，或者由于飞机带着激光移动，都可以减轻这种效应。

脉冲类型的激光输出能够更有效地将能量输入靶材。例如，凯特兰美国空军基地的美国空军武器实验室的科学工作者实验指出，脉冲输出可有30—40%的能量耦合到靶材上去，而连续波只有3%的能量被吸收，相差一个数量级。

脉冲激光的另一个最重要的特性是它对材料的破坏效应。虽然脉冲产生的破坏机理是复杂的，目前不管在理论上和实验上都还未认识清楚。总的说来，它是力学和热效应的结合。

就目前而论，脉冲破坏机理有几种说法，即，热爆炸机理，脉冲激光使材料汽化穿孔破坏，激光冲击波引起的层裂破坏，冲击屈服变形破坏，X射线或紫外线辐射破坏。

爆炸，断裂破坏较之烧蚀有明显的好处。因为造成同样体积破坏，断裂所需要的能量小，在断裂中，只要拉开两个断裂面之间的键。而烧蚀则要将去除的材料的全部键拉开。因此断裂同样体积大小的材料要比熔化喷溅低 $10^5$ 倍的能量。

高强度脉冲光束辐照下，靶材产生高温等离子云，等离子云产生紫外辐射和X射线辐射效应。这种效应不但对靶材的破坏增加而且热耦合也增加[6,7]。等离子体的点火效应还影响着靶面压力的耦合，因此等离子体效应是一个引起很大兴趣的课题。

美国曾由激光脉冲得到的冲击力为大气压的70倍，而苏联研究者说，它们测得的诱导冲击压力高达200大气压。对于高韧性材料，如果激光脉冲引起的压力能够使材料到达屈服点以上，那么在快速射击下的一系列脉冲作用能够使变形不断增加直到金属破坏。

文献[8]的理论分析指出在脉宽 $\tau=10^{-8}$ 秒时，对靶材产生的压力与功率密度有如下关系。

I(瓦/厘米 <sup>2</sup> )	$10^8$	$10^{10}$	$10^{11}$	$10^{12}$
P(巴)	$1 \times 10^3$	$4.8 \times 10^4$	$1.6 \times 10^5$	$7.8 \times 10^5$

### 三、高能脉冲激光的种类

最早发展的脉冲器件是固体激光器件，这类器件单路曾达到千焦耳的输出，但这类器件造价太高，效率低，光束传输性能也不好。

近期，唯一的脉冲激光候选者是放电( $O_2$ )激光器。

脉冲放电化学激光器，如HF，HCl，HBr以及用D置换H的DF，DCl，DBr[9]，都有一定进展。例如，HF脉冲激光，不包含放大器的振荡器本身的输出已达4.2千焦耳的水平。

脉冲工作的CO激光器也有相当的发展[10]。

准分子激光方面是新的优选者，高级研究计划局做了许多研究和探索工作。

自由电子激光可调谐性允许其辐射波长适应于大气传输窗口，这具有重要意义。此外， $\tau$ 射线，X射线激光也在探索中。

## 四、研究脉冲激光与材料相互作用现状

美国防部已经部署力量进行脉冲激光破坏效应的研究。现在要研究激光可能应用的全部频谱,以判断在那一种状态下,冲击效应能增加对破坏的耦合。其研究例证包括,洛克希德导弹和空间公司承担的弹道导弹防御激光易损性和各种效应的研究;阿符科,埃弗雷特研究实验室承担的重复脉冲效应和易损性试验;巴特尔,哥伦布实验室进行激光维持爆震波在各种金属和合金上点火的早期加热过程;研究与发展联合有限公司担负的高能激光效应分析研究;麦克唐纳飞机公司承担的脉冲激光破坏的研究;通用电气公司进行的弹道导弹再入飞行器热防护材料的激光效应研究。

脉冲激光具有高峰值功率,破坏机理的某些非线性效应显著。AVCO的VH,Shui, L. A. Yong和J.p.Reillin七八年初在美国航空学会和宇宙航空学会上介绍了脉冲激光试验成果。他们的工作包括激光对表面冲击传递的实验和理论工作,都是按环境压力为一大气压或接近一个大气压来进行的。实验表明,在环境压力为0.5毛时,激光传递给2024-T<sub>3</sub>型飞机铝合金靶的冲量,起初随光强增加而增加,随后达到平衡。当激光强度较低为100焦耳/厘米<sup>2</sup>时,冲量大小与靶材的性质有相当大的关系,可是在能量水平为1千焦耳/厘米<sup>2</sup>时,激光传递给靶材的冲量对所有的靶材是近乎相同的。

在试验时如果在铝靶上涂一层聚氨基甲酸酯涂料,则激光传递给该铝靶的冲量比没有涂料的铝靶增加了五倍。AVCO的科学家们还指出,用1100型铝靶材料在脉冲作用下产生压坑这一事实表明,在真空中经脉冲激光照射靶材,有可能产生结构变形<sup>[5]</sup>。

为了研究重复脉冲作用下的靶材效应,波音飞机公司<sup>[18]</sup>和休斯飞机公司<sup>[14]</sup>的科学家们进行了实验和理论分析。由于对空间激光武器的应用的重视,所以研究在各种不同环境压力下脉冲激光对靶材的破坏的机理异常活跃<sup>[43]</sup>。当然,对脉冲激光而言,首先需要探讨清楚的是脉冲激光产生的动力学过程。如点火,等离子体爆震波,燃烧波,冲击波效应及破坏阈值的研究<sup>[11]</sup>。

苏联的研究也从文献报导上有所透露<sup>[12]</sup>。证明对脉冲激光作用机理也是很重视的。据称,苏联在这方面研究较美国投资要大,而且严格保密,很难得到确切的材料。

## 五、CO<sub>2</sub> 脉冲激光的大气传输

激光在大气中传输时,有五种能量衰减过程。其中三种是线性效应,即分子吸收,悬浮微粒的吸收和散射以及大气湍流。另外二个为非线性效应,即热晕和悬浮微粒击穿。

热晕是由于空气被加热引起的,空气被加热后密度减小,引起折射不均效应,并将导致激光束散焦。在解决热晕问题中,脉冲激光比在同样波长工作的连续波激光器具有天生的优点,因为它能提供相当短的脉冲持续时间和足够低的脉冲重复率。

先前认为CO<sub>2</sub>激光输出很容易被空气中的CO<sub>2</sub>分子吸收,使空气加热。最近提出了“漂白”机理,对于减少在空气中CO<sub>2</sub>分子对10.6微米的吸收是有效的。

其漂白机理为,激光束中的10.6微米的光子迁到第一激发态(1-0-0态)的CO<sub>2</sub>分子,CO<sub>2</sub>分子将吸收光子激发到0-0-1态。这种受激态抑制它从光束中吸收更多的激光

光子。已经激发的 $\text{CO}_2$ 分子通过碰撞，将能量传给氮分子，然后又回到原来的基态（ $1-0-0$ ），重新从光束中吸收光子。

在大气中处于 $1-0-0$ 态的 $\text{CO}_2$ 分子约有0.1%，一旦 $10.6$ 微米激光束激发在光路上所容纳的 $\text{CO}_2$ 分子，激光的其余光子能够通过而不被吸收，而且激发的 $\text{CO}_2$ 分子反转时将仍以 $10.6$ 微米的光子出现。这种机理表明，只要激光束提供了漂白过程所需的能量，则剩余的能量相对而言不再衰减。

早期引用的资料表明， $\text{CO}_2$ 激光在海平面传输时，每公里损失能量33%，而氟化氙激光为2%/每公里，但是漂白技术提出以后，最新报告对于 $\text{CO}_2$ 激光比早期资料降低了50%，大约为18—20%/公里。与此同时，关于 $3.8$ 微米波长的分子吸收的最近实验资料，损耗指标增加了5倍，为10%/公里。所以陆军传输专家否定了原先认为DF: $\text{CO}_2$ 的优越性为20:1的结论，而认为只有2:1。

必须指出，早期的“悬浮微粒”消光（吸收和散射）所引起的激光损耗，对于二种类型的激光有所忽略。最近实验证明，短波长的DF损耗为10%/公里， $\text{CO}_2$ 只有1%/公里。若在一区域中有较大的灰尘和其它颗粒物，DF的损耗还要继续上升。

基于上述分析，对于大多数情况，DF和 $\text{CO}_2$ 二者的大气传输特性大致相当。

分析表明，悬浮微粒击穿非线性效应，它限制了最大的瞬时光束强度，并因此对具有高峰值功率的脉冲激光器造成了困难。

## 六、展 望

“死光”武器的实现被称为“超级科学竞赛”已经付出了一代人的努力。就现有的连续波激光器件而言，最有希望做为激光武器的优选者是化学激光器。但分析表明，不论是 $\text{CO}_2$ 气动激光还是DF化学激光作为长距离的地基战略反导武器的实现是很不乐观的。但对战术武器，例如反飞机，反坦克，反舰艇，破坏武器的软件及杀伤人体来说，在某些特殊情况下已经可以初步试验应用。预计，最有前途的应用将在离开大气层的空间领域中，如反卫星激光武器。因为在那里，不存在什么大气传输问题。连续波激光器的研究，从这个意义上说是有重要价值的。

强脉冲激光输出破坏目标是近年来注意的重点。脉冲破坏机理及耦合性是重要的研究内容。这些问题探讨清楚有助于正确地判断激光武器的可行性。用强脉冲激光实现战略反导是一个值得积极探索的问题，困难当然是很多的，随着研究的深入，强脉冲激光在军事中的位置会益加重要。

## 参 考 文 献

- [1] Science News, Vol. 110 1976, 73, p. 11-13
- [2] Armed Forces Journal international 76, 9, p. 14
- [3] AV & T 78, 8, 7, p. 4
- [4] Av & T 78, 8, 21, p. 34

# 雪崩光电二极管最佳工作点的确定

二〇九所 霍联正 余永琪

本文根据雪崩管的倍增噪声特性,给出在最佳工作状态下,雪崩光电二极管的倍增噪声电流谱密度与放大器的等效输入噪声电流谱密度之间的数量关系,提出按照放大器本身的噪声电压在输出总噪声电压中所占的比例来确定雪崩光电二极管的最佳工作点的方法。用这种方法确定了厚耗尽层雪崩光电二极管的工作点,用该雪崩光电二极管作激光测距仪的探测器时,使测距仪的测程比用 pin 硅光电二极管时提高一倍以上,接收灵敏度提高约二十八倍。

## 一、引言

硅光电二极管是一种比S-1光阴极的光电倍增管实用的近红外辐射探测器,通常硅光电二极管的噪声电平低达 $10^{-14} \text{A}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的量级,可是用它作探测器的激光接收系统的灵敏度却只能达到 $10^{-12} \text{A}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的量级,因为受到晶体管宽带放大器噪声电平的限制。这便促使人们进行雪崩光电二极管的研制。雪崩光电二极管中产生的光生载流子被电场加速,并且在高场区引起强烈的碰撞电离,使信号电流获得倍增,使信噪比得到数十倍的提高。

- 
- [5] AW & ST 78,8,28,p.56
  - [6] AW & ST 75,9,p53
  - [7] J. Appl. Phys. 44, 1973, p 2311
  - [8] J. Appl. Phys. 47, 1976, p 2966
  - [9] 《应用物理》45, 1976, p 920
  - [10] Japanese Appl. phys. 18, No. 1, 1979, p 123
  - [11] J. Quant Elect. Q - E14 No. 2, 1978
  - [12] Физика и химия обработки материалов, No. 3, 1978, p. 23, p. 159
  - [13] J. Appl. phys. 49, 11, 1978
  - [14] J. Appl. phys. 49, 10, 1978
  - [15] Appl. phys. Lett. 25, 1974, p. 558
  - [16] Phys. Fluids 16, 1973, p. 1435
  - [17] AIAA Journal 15, 1977, p. 83
  - [18] J. Appl. phys. 47, 1976, p. 2486