
电子图书
信息技术的结晶
人类文明的载体
网络的基本资源

第一章　激光之源

一　激光之父

爱因斯坦（1879—1955 年）的相对论使人们改变了对整个世界的看法。简单讲来，相对论认为，宇宙的最高速度的光速；质量随速度增加；坐钟在空间转动的速率随速度的加快而减少；能量和质量遵从下述关系：能量=质量×光速 ^{2}。这从后来原子裂变的过程中得到证实。

然而，激光与爱因斯坦之间的关系如何？并不是每一个人都很了解的。

关于微波激射器与激光器的基础理论，早在 1917 年，爱因斯坦就对物质的发光机制作了深入研究，在研究原子系统与辐射场相互作用的微观过程时，提出了受激发射的概念。受激发射是微波激射器和激光器得以发明的理论依据，为 40 年后的“光源革命”开了先河。

爱因斯坦受激发射理论的基本内容是，假设某微观粒子（原子、分子或离子）有两个分立能级，高能级能量为 E_2，代能级能量为 E_1，能级上的粒子数密度分别为 N_2 或 N_1，考虑到粒子与电磁场相互作用时，爱因斯坦指出，存在三种类型能级跃迁：a）自发发射。处于高能级上粒子在不受外界电磁场作用下，自发地跃迁到低能级并发射能量为 $hv=E_2-E_1$ 的光子；b）受激吸收。如果频率为 $v=（E_2-E_1）/h$ 的电磁波与处在 E_1 上的粒子相互作用，则粒子可吸收入射电磁波而跃迁到高能级 E_2 上；c）受激发射。如果频率为 V 的电磁波与处于高能级 E_2 上的粒子相互作用，粒子将从高能级跃迁到低能级 E_1 上而发射一个与入射电磁波频率相同的光子。受激发射的光子与入射电磁波具有相同的频率、位相、偏振和传播方向，它们是相干的。爱因斯坦又指出，受激发射和受激吸收过程是同时存在的，并且跃迁几率相等。按照玻耳兹曼分布规律，在热平衡条件下，处于低能级上的粒子数 N_1 多于高能级上的粒子数 N_2，这时受激吸收总是大于受激发射，所以通常只能观察到受激吸收而观察不到受激发射现象。由于那时的客观条件限制，人们还看不到受激发射理论在实践中的应用，爱因斯坦的这一颇具建树的首创性激光理论，未能引起人们重视。

后来的实践证明，爱因斯坦提出的激光理论具有划时代的先驱业绩，因而功不可灭。爱因斯坦被人们誉为“激光之父”，乃当之无愧，受之有理！

二　后学助威

第二次世界大战后，日臻成熟的微波电子技术促进了微波波谱学的发展，同时人们对物质微观结构也有了较深入的了解，而一些实验与理论上的问题，如在光谱学的研究中所观察到的许多超精细结构也急待加以解释，这些都促成了微波量子电子学的诞生。几年时间里，人们发现了一系列磁共振现象。

1946 年，布洛赫在做核感应实验时，观察到微波辐射和工作物质间的共振信号，并首次观察到粒子数反转（即　N2＞N1）的实验现象。

1951 年，一些科学家在美国华盛顿讨论如何发展比激波频率高的辐射的应用于通信及其他领域的问题，汤斯对此十分感兴趣。他设想用某种方法破

坏热平衡分布，使多数分子处于较高能级，然后用微波照射这些分子使其受激而辐射能量，这就可以起到放大电磁波作用，最后再把一部分发射的电磁波反馈到仪器中去激发处于高能级的分子，便可能形成振荡。他与另两位助手经过三年试验，经于研制成功了最早的微波激射器——氨分子量子振荡器。苏联的巴索夫和普罗霍洛夫几乎与汤斯同时也独立研制出氨分子微波激射器。

从微波激射器到光激射器有许多新的问题需要解决，其中一个重要的问题是光频谐振腔的设计与制造。根据电磁学原理，为了在谐振腔内保持单一模式振荡，腔的尺寸应与电磁波波长具有相同数量级。光波波长比微波波长小四、五个数量级，制造尺寸与光波波长（A 即 10—8 厘米的数量级）相当的谐振腔在技术上几乎是不可能的，因此，必须寻找一种新的解决办法和途径。1958 年，科学家肖洛和汤斯在一篇著名文章中讨论了由微波激射器到激光器所存在的问题，指出了使光源转变成的受激发射为主的可能性，给出了应该满足的条件，并提出了解决问题的建议。他们建议，使用一种叫法布里—珀罗干涉仪形式的两个平行平面镜作光频谐振腔，使振荡维持一个或少数几个模式。这是从微波激射器到激光器发展过程中关键的一步。汤斯和肖洛在最初的考虑中，建议用钾蒸气作激光工作物质，用钾光谱灯作激励光源。当时，他们也分析了红宝石的几条荧光谱线，认为红宝石的 R1 线很难实现受激发射，因为这条线终止于基态，不易实现能级间粒子数反转分布。

尽管如此，他们的这一重要启示，很快在科技领域内激起了一股研究激光器的狂潮，相继出现了各种各样的实验方案。

无疑，汤斯等人的研究成果，已将激光技术的研究与实验向前大大地推进了一步。

三　世界首台激光器的诞生

美国休斯顿实验室的梅曼教授，在研究激光技术的进程中，提出了利用掺铬的红宝石晶体作为发光工作物质，用发光强度很高的氙灯作为泵浦源的方案，冲破禁区，经过约两年的时间，终于在 1960 年 5 月成功地获得了激光，制成世界上第一台红宝石激光器。

梅曼的红宝石激光器由三部份组成：工作物质——红宝石晶体；步频谐振腔和泵浦光源——脉冲氙灯；梅曼将红宝石做成长 4.5 厘米，直径 0.6 厘米的圆棒，把它的两端抛光成光学平面并镀银的形成法布里——珀罗光频谐振腔，其中一端膜中央有一透光小孔，使产生的激光由小孔射出。红宝石固定于螺旋形闪光灯管中央，闪光灯每闪光一次，小孔或半透膜中便射出深红色（波长 6943 埃）的激光。

汤斯、巴索夫和普罗霍洛夫因对微波激射器和激光器发展做出卓越贡献，而荣获 1964 年诺贝尔奖金。可是，最早提出实现光频能级间粒子数反转分布方法并申请过专利的是加里福尼亚大学辐射实验室（汤斯当时是该实验室主任）的研究生古尔德，只是由于他没有认识到需要选择适当的振荡模式而未能成为激光技术的开拓者。

四　中国红宝石激光器

世界上第一台激光器研制成功不久，1961 年 9 月，我国第一台红宝石激光器也相继研制成功。

我国第一台红宝石激光器在长春研制成功的。当时，能够获取有关的激光器科技情报非常有限，为了我国经济建设与国防建设的需要，科技工作者们毅然决定依靠自己，自力更生，克服了重重困难，立即投入研制。我国科技工作者提出的新光源研制方案，是利用掺铬的红宝石作工作物质，用脉冲氙灯作泵浦源（激励源），两块互相平行的反光镜组成共振腔。这个方案，与世界上第一台激光器是相类似的。我国自行设计的工作方案中，做泵浦源的氙灯不是螺旋状的，而是直管式的；作为工作物质的红宝石棒也不是像梅曼教授的那台红宝石激光器那样插在氙灯的螺旋圈内，而是把红宝石棒和氙灯置于一只球形聚光器的球心附近，这样便能通过聚光器的聚光作用，来提高氙灯泵浦红宝石受激发射的效率。

采用脉冲氙灯作泵浦源的依据是，根据理论计算，对泵浦源的要求为它照射到红宝石棒表面每平方厘米的光功率，至少要达到 15 万瓦，可一般的电光源则无法达到这个要求。氙气是一种稀有的惰性气体，在每 100 升空气中大约只有 0.0087 毫升的含量，而制作氙灯的氙气还必须达到极高的纯度，直接从市场购买的氙灯只在国外有售，而国内却是一个空白。经过上下各方的努力，很不容易才在上海一家灯泡厂找到所需的氙气。可放电管吹制出来后，做好的灯管放不了两天，便出现炸裂。因为氙灯的电极用的是钨材料，放电管用的是石英玻璃，二者的膨胀系数不相匹配。试验中，发现派勒克斯玻璃倒是能与钨电极匹配，但它的机械强度却不如石英玻璃，灯管制成后，管内通过强大电流时，同样会发生炸裂。后来经过反复试验，制出一种新品种玻璃，这种玻璃的膨胀系数是渐变的，一头的膨胀系数与石英玻璃相同，另一头的膨胀系数与派勒克斯玻璃相接近，这既使灯管与钨电极相匹配，又有足够的机械强度。

在制作掺铬红宝石棒的工作中，同样也遇到不少难题。红宝石是一种晶体，它的化学成分为三氧化二铝（Al_2O_3），掺进一定浓度的三氧化二铬（Cr_2O_3）后，经精密光学加工，便成了新光源所需的工作物质。他本身要有极好的光学均匀性，在它的两个端面还要用光学研磨的方法磨成光学质量相当高的光学平面，表面的不平整程度要小于红宝石棒所发射的光波波长的 1/20，而且两个端面彼此平行的偏差度小于 5″，两个端面镀上银膜之后，一端的反射率要达到 99%以上，另一端要求透过率则为 2%—5%。这种高精度的晶体光学加工以及与之相应的检验技术，在我国尚属一个全新的课题。我们的科技工作者，夜以继日，通力合作，在无数次试验与探索中，硬是攻克了一道道难关。各种元件都已配备齐了，一台新的光源装置按照设计方案安装起来了，万事齐备，只欠东风。

受激光射的光究竟是什么样子，人们心中无底，毕竟在此之前，谁也没有亲自见过啊！根据理论分析与计算，我国的这一台新光源装置所发射的光束呈鲜红色，光束发散角应当很小，集中在一个方向上。用一种叫做法布里—珀罗干涉仪测量，光束应有极好的相干性，光谱线宽度较窄，光的方向性、相干性、谱线宽度等都应表现出阈值特性。给泵浦源（氙灯）加的电压只有达到某个数值后，光的方向性、相干性、谱线宽度等才能与理论分析相符合，低于这个数值，光束的这些性质会很差，光辐射强度也会急剧下降。

可是，实验中人们所期待的那束呈鲜红色，并没有如期而至。把储能器

的电容增大了，加上氙灯的电压提高了，依然不见红光斑的出现。有人提出：是不是红宝石掺入的铬离子浓度不够？于是，又准备了几根掺入 Rr2o3 浓度不同的红宝石棒，棒的端面也进行了十分精细的光学加工。终于，红光斑出现了！重复几次的出现红光斑，闪闪烁烁，格外娇艳。可好景不长，不久由干涉仪拍摄的干涉图片冲洗出来后，人们又一次陷入失望，这束红光并不是受激辐射所致。科技工作者怀着一线希望，认为也许这台新光源已调度到接近受激辐射的临界点了吧？加大氙灯的输入能量试试，又如何呢？氙灯的电压一次又一次提高，达到 1500 伏，随着氙灯的闪光，从红宝石棒的一端射出的一束鲜红的光束，在屏幕上投入一个圆圆的光斑。多次试验，结果一样。干涉仪测量结果显示出光束的发散角很小，全部光辐射的能量集中到了 0.01 孤度的圆锥角内,光束有很高的相干性,光谱线宽度在 0.01 纳米(1 纳米=10-9 米）以下。受激发射的光源，终于在中国大陆的科研实验室里闪烁着鲜红的光束！

五　“ 激光 ”——中国的专利

激光的英文全称为：Light Amplification of Stimulated Emission of Radiato in，缩写为 LASER，愿意为受激辐射光放大。而我国制成这种新光源之初，人们称它为“ 光的受激辐射放大器 ”。一来这个名字太长，二来念起也有点别扭，书写也不太方便。便有人把它压缩为光激射，也有按基本意思称它为“ 光量子放大器 ”的，有人干脆按 Laser 的译音，称为“ 莱塞 ”或“ 镭射 ”。可较为麻烦的是，只要一提到莱塞，随后还得加注一长串的解释：也叫光受激辐射放大器，光量子放大器，光激射器，镭射等等，总让人感到不太理想。

在此基础上，《光受激发射情报》杂志社（即现在的《国外激光》杂志）编辑部给我国著名科学家钱学森写了一封信，请他给 Laser 取一个中国的名字。钱学森给编辑部回信，建议命名为“ 激光 ”。1964 年冬天，在上海召开的全国第三届光量子放大器学术报告会上，提交了钱学森的这个具有中国特色，属于中国专利的建议，受到与会者的一致赞同，从此统一了命名，以“ 激光 ”风行天下。

“ 激光 ”这个名称，显然比“ 光受激辐射放大器 ”、“ 光量子放大器 ”、“ 光激射器 ”等来得简短，而比起“ 莱塞 ”、“ 镭射 ”等纯属音译的名称，“ 激光 ”更具中国风味。更重要的是很确切地表达了这个概念的基本意思。“ 光 ”字的意义本身十分清楚，“ 激 ”则很容易使人联想到“ 激发 ”，“ 激励 ”的一类概念。“ 激光 ”是汉语中的缩写，Laser 则是英语中的缩写，前者可望文生义，后者即连那“ 光 ”的影儿也见不到。

世界上第一台红宝石激光器，只能输出单一的波长波光，它输出的波长为 6943 埃（1 埃=10-10 米）的红光，激光输出为间歇式脉冲输出。我国的科技工作者大胆设想，勇于创新，希望自己研制的激光器能像收音机那样根据人们的需要自由调谐。

我国科技工作者选定的下一个目标是，以氦——氖混合气体作工作物质氦——氖激光器。这种激光器打到屏幕上的红光斑应连续发光，调整反射镜时，红光斑变换出各式花样——激光模式花样。它随着激光器工作条件变化而发生变化。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

激光器的种类按工作物质划分，有固体激光器（如红宝石激光器）、气体激光器（如氦——氖激光器）、半导体激光器如染料激光器等。固体激光器中，特别引人重视的是钕玻璃激光器，它的工作物质是将稀土元素钕掺入到硅酸盐或磷酸盐玻璃中制成的，造价低输出能量高。我国在研制钕玻璃激光器方面，令举世瞩目。半导体激光器具有小型化与用途广泛的特点。染料激光器输出的波长可调谐，有着极为特殊的应用价值。

研究工作中发现，单靠加大工作物质的体积，既受到技术上的限制，又不很实用，而靠提高泵浦源的功率，也有一定限度，超过了限度，激光器输出功率不但不再同步提高，反而使激光的性能减弱。我们的科研人员在激光器共振腔上打主意，于是产生了调 Q、锁模等特殊技术。采用调 Q 技术，同样一台红宝石激光器，输出功率猛然提高 100 倍，后来发明的更为先进的调 Q 开关，使激光器的峰值功率达到亿瓦至 10 亿瓦，光脉冲闪光时间缩短至亿分之一秒。而利用锁模技术，可产生闪光的时间只有万亿分之一秒的光脉冲，峰值功率达到百万亿瓦。

六　光之单色

太阳光的波长连续地分布在从红外光的很宽的波长上，因此，太阳的辐射能量就分布得很散，落到苛一个很小的波长的间隔能量就很小。根据计算得知，它的波长 650 纳米（红光）附近的亮度是 1560 尔格·秒—1·厘米—2·纳米—1。

激光与普通光源都不尽相同。它的方向性极强，光束的发散角极小，而且辐射能量集中在非常窄的波长间隔内。这样，便产生了其他光源不可比拟的一个特性——亮度高，辐射能量高度集中。输出功率只有千分之一瓦的氦——氖激光器，光束的发散角仅千分之一孤度，能量集中在波长 632.8 纳米（红光）附近，波长间隔只有亿分之一纳米的范围内。由此便可以算出氦——氖激光器产生的激光亮度为 1014 尔格·秒—1·厘米—2·纳米—1，比太阳光的红光附近的亮度高 600 亿倍！

1666 年，牛顿做了一个实验，他让一束太阳光射入暗室，用一块三棱镜投射到白色屏幕上，发现屏幕上映出的是一条红橙黄绿青蓝紫的七色光带。牛顿研究这种现象后得出结论：白色的阳光由红橙黄绿青蓝紫七种光混合而成。而这七种光分别都是单色光，这七种混合而成的白光叫复色光。复色光能分解为七种单色，是因为它在经过三棱镜时发生了折射，而各种单色光对同一种透明材料的折身率各不相同，于是在经过棱镜折射后就发生了实验显示的色散现象。

七种单色光中，红光的波长最长，折射率最小，在白光折射成的七色光带上总处在最外圈，橙光的波长仅短于红光，折射率则稍大于红光，在七色光带总处于第二圈，其余类推，紫外光波长最短，折射率最大，在七光带上总处于最内圈。

比红光的波长更长的光叫红外光，比紫光的波长更短的叫紫外光。我们把红外光与紫外光称为不可见光，而相应地把红橙黄绿青蓝紫七色光称为可见光。

光波是整个电磁波大家族中的一个小家庭，这个小家族的“家谱”仅是整个大家族“族谱”的一部份。而整个电磁波大家族的“族谱”叫电磁波谱。

电磁波谱中，波长更长的无线电波，微波排在光波的前面，波长更短的 X 射线及 r 射线排在光波的后面。它们分别占据一定波长范围（波段），依次为邻，但并无十分严格的界限。可见在电磁波谱中占据大约是从 7000 埃到 4000 埃很小的一个波段，这个小波段可依红橙黄绿青蓝紫分为更小的波段，还可作更进一步细分。其实，光波段的每一种细分的小波段，都可对应某一种色光，可有无穷多种不同的色光。

一束单色光通过一条狭缝后，经过棱镜射到屏幕上，会显示出一条有一定宽度的亮线，这就是光谱线。光谱线亮度并不均匀，中间最亮，两边逐渐减弱。最大亮度对应的波长为这束单色光的中心波长，将亮度为最大亮度一半的两个波长间的密度，称为这束单色光的谱线宽度。谱线宽度大，这束光波长范围则大，包含不同波长的光少，因此单色性较差，谱线宽度小，这束波长范围则小包含不同波长的光少，因此单色性较好。谱线宽度为零，而具有唯一波长的光，才是真正的单色光。但纯而又纯的单色光并不存在，任何光源都有一定的谱线宽度。

普通光源单色性一般比较差。太阳光中红光的波长，覆盖了电磁波谱中的全部红光波段。单色性最好的普通光源要数用同位素氪——86 制成氪灯，它发出的橙红色光，中心波长为 6057 埃，谱线宽度仅千分之五埃左右。1960 年第十一届国际计量会议决定采用氪——86 在真空中发射的橙红色的波长 6057 埃作为国际长度标准，长度单位“ 米 ”即由此定义为这种光波长的 165076.73 倍。

不久，激光器问世了。这种崭新的光源，才真正摘取了单色光之冠的桂冠。如氦——氖激光器发射的红光中心波长为 63.28 埃，谱宽度仅有千万分之一埃，将氪——86 创造的单色性世界纪录一下子提高了 10 万倍。

七　步调一致的光源

19 世纪初，牛顿的一位同胞，英国医生兼物理学家托马斯·杨曾经做了一个著名实验，后来麦克斯韦的电磁理论又揭示光也是电磁波，“ 波动说 ”终于为科学界广为接受，因此，人们将托马斯·杨的实验称为“ 波动说的判决性实验 ”，这一实验的重要性在于它显示了光的干涉现象。

这个实验是这样的：实验中设置了两块平行的遮光板，第一块上开有一小孔 S，第二块上开有两个小孔 S1 和 S2，他用强烈的单色光照到第一块遮光板，通过小孔 S 后成为一束细小的光，再照到第二块光屏上（遮光板又称为光屏），通过小孔 S1 和 S2 后，在前方的屏幕上就显示出一列明暗相间的条纹（称为干涉条纹）。这种现象用“ 微粒说 ”无法解释，而干涉现象恰恰是波动所独具的一个重要特征。杨氏干涉实验千真万确地显示了光的波动性。

普通光源发出的波光，杂乱无章。象白炽灯泡发光的是钨丝中的原子，每立方厘米钨丝中约包含 1023 个原子，每个原子均发出一列光波。假如其中只有　100 亿分之一的原子发光，也呆发出 1013 列光波，它们的波长长短不一，发射方向不尽相同，发光时间也有先后之分，同时，延续时间也非常短。显然，这样的光波，不能满足相干条件。两个普通光源发出的光在空间相遇后叠加的结果，使光的强度到处都加强了，却不能显示出时强时弱，有规则变化的干涉花样。

普通光源要获得相干光，必须采取特殊的装置。杨氏的实验，正是巧妙

地设计出了特殊的装置，才率先获得了两列相干光。很遗憾，这样的相干光，强度已减弱到实际上不能利用的地步。激光器的问世，为我们找到了号令统一，训练有素，步调一致的相干光源。杨氏的实验装置中拿走第一个光屏，直接让激光通过第二个光屏的两个孔 S1 和 S2，也同样获得清晰而稳定的干涉条纹。

八　光与激光

西方的《圣经》中说，太初之时，宇宙一片混浊，暗淡无光。上帝告诉人们：“ 要有光！ ”于是，光明与黑暗便分开了。光明就是白天，黑暗就是夜晚。夜尽昼始，这便是世界的第一天。第二天上帝分出了天与地，第三天上帝分出了陆地与海洋，第四天上帝造就了日月星辰，第五天上帝造就了飞禽走兽，第六天上帝造就了万物，第七天上帝累了，开始歇息。后来又有“ 万物生产靠太阳 ”的说法，可见光对于我们这个世界是多么的的重要啊！

激光也是一种光，但它的发射方式以及许多特性质与普通光却不一样。了解激光产生和性质之前，我们有必要了解一下光的产生以及性质。

原子是由原子核和核外电子所组成，电子总是在一些可能的轨道上绕核运动，由于运动轨道不同，原子具有的能量状态也不同。这个能量状态叫能态，最低的那个能态称基态，其他的称为高能态。电子总是力图处于低能态上，处于不同能态轨道上的电子，能够在这些轨道上跳来跳去，叫做“ 跃迁 ”。电子从低能态向高能态跃迁时，要吸收一个光量子（光量子又叫光子），从高能态往低能态跃迁时，要发射一个光子，这就是发光。如果从高能态往低能态跃迁时是电子自发进行的，这时发出的光叫“ 自发发射 ”，就是人们常见的那种普通光。如果电子是被别的光子“ 推到 ”低能态去而发射的光，这种发射叫“ 受激发时 ”，入射一个光子，射出的变成了两个，光显然是被放大了的，这就叫“ 受激发射光放大 ”。

光既是粒子又是波，由于光的粒子性，它能直线传播，光的传播速度为每秒钟 30 万公里。光又是一种波，一种在本质上与电磁波一样的波。光的波性又使光具有衍射，干涉等性质。光由于光波波长的不同而显示不同的颜色，红光的波长最长，紫光的波长最短。激光也同普通光一样具有上述性质。

当然，激光还具有普通光所不具备的一些特殊性质。所以，我们可以这样认为：激光是原子受激发射产生的，具有特殊性质的光。可以毫不夸张地说，在今天看来，激光已并不神秘，只不过我们对此缺乏一些更深层次的理解与了解而已。

九　受激吸收与能级系统

发光物质除了发生自发辐射、受激辐射之外，还有一个受激吸收过程。一个原子处在基态 E0，如这时有一个能量为 hr（=E1-E0）的光子接近这个原子，就可能被这个原子吸收，把这个原子激发到激发态 E1。这就是受激吸收过程。光波通过物质时，强度减弱，就是因为部分光波能量被物质的原子吸收。吸收、自发辐射、受激辐射这三种过程，在发光物质如光相互作用时总是同时存在的。

要使发光物质的受激辐射为主，就得使物质中的原子实现粒子数反转这

样的状态。我们能否也用一种泵浦，比如说强度很大的光源，通过受激过程，把大量的基态原子抽调到激发态，实现粒子数反转呢？

我们已知激发态寿命极短——原子居留在激发态的时间大约只有亿分之一秒左右，又回到基态。受激吸收，也是我们应注意的一个问题。

我们的科技工作者终于找到了 4 能级系统的激光工作物质。而掺进红宝石晶体中的铬工作物质，建立的粒子数反转仅涉及 3 个能级，通常人们称此为三能级工作系统。

在 4 个能级系统中有 E1、E2、E33 个激发态。由基态 E0 跃迁到 E3 的原子迅速转移到 E2，而 E2 系亚稳态，寿命较长；E1 则寿命很短，到了 E1 的原子很快又回到基态。这样就可以在 E2 与 E1，这两个激发态能级之间实现粒子数反转。

氖原子的能级结构就相似于 4 能级系统。通过实验证明，人们又制成了氦、氖混合气体作工作物质的激光器。这又使激光器的功能向前大大推进了一步。

十　振荡——振荡

首先，让我们来做一个有趣的实验吧。在一张条桌两端分别放置一块档板，两块档板之间的桌面上摆一些弹子球。当一枚弹子球从档板上反弹回来时，便可能碰撞别的弹子球朝向同一方向滚动。假设每一枚从档板反弹回来的弹了球都刚好与桌面上的一枚弹子球正面相撞，并有足够的力量使它们一起滚向另一端的档板。在这种情况下，我们开始做这个实验。我们先让一枚弹子球向左端的档板滚动，反弹回来后就会成为有 2 枚弹子球滚向右端的档板，再一次反弹后则又会成为 4 枚弹子球滚向左端的档板，不断这样滚动，每一次反弹都会使滚动的弹子球数目翻一番。来回振荡的次数越多，滚动的弹子球也就越来越多，积聚的能量也越来越大。这时，我们突然拿走一端的档板后——比如拿走右端的那一面，这样大量的弹子球就会象出膛的子弹一样从条桌的右端射将出去。这种现象中，两端放置档板的条桌即可称为共振腔。这个共振腔除两端的档板和桌面外，其他方向均开放。如有的弹子球朝向那些开放的方向滚动，便会脱离这个共振腔，这个可能影响其他弹子球偏离在两块档板之间振荡的路线，这就使弹子球只能在垂直于两块档板的轴线方向上越滚越多。

让我们将这两块档板换成两面反射镜（其中一面是全反射镜，另一面是部分反射镜），在它们之间放置的是红宝石棒或充氦——氖混和体的放电管；这时“弹子球”是红宝石棒中的铬离子或放电管中的氦——氖原子所发射的光子，这我们不必担心它们受重力作用而坠落，因此“旧顶”这个方向也可以开放了。这就是我们造成的激光器的共振腔。

用脉冲氙灯照射红宝石棒，或接通氦——氖放电管的电源，相当于启动把铬离子或氦、氖原子抽到激发态的泵浦。激发态的粒子自发辐射光子——“弹子球”开始滚动。其中有些光子偏离了轴向，从开放着的方向飞出共振腔，只有沿轴向“滚动”的光子，才会从反射镜这面“档板”上反弹回来，成为诱发激发态粒子作受激辐射的因素，引起轴向的受激辐射，并产生雪崩式的光子放大。大量轴向“滚动”光子，在“碰”上那面部分反射镜时，一部分反弹回来继续在共振腔内振荡，另一部分则透射出去，这就是激光。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

现在，我们终于明白了激光器是由三个主要部分构成的——即激光工作物质、激励能源装置和光学谐振腔。

同时，我们也由此进一步知道了激光的特点：1.方向性好。就是平行度高，发散角小，激光束的发散角已达到二、三分，所以人们常常称激光为“ 平行光 ”。2.能量高度集中、亮度极高。3.单色性好。4.相干性好。受激辐射后的光子具有相同特征，它们如从同一个辐射发出，其频率、共振方向都相同，所以相干性特别好。

第二章　激光之战

一　真实的幻想

历史曾经有过关于强光武器的传说。

公元前 3 世纪，强大的罗马军队进攻希腊的叙拉古城，遭到城内将士的顽强的抵抗，著名科学家阿基米德也加入了抵抗侵略者的行列。传说阿基米德发明了一种掷石机，掷石机猛烈掷出雨点般的石块，将逼近城墙的罗马士兵打得头破血流。他发明的鸟嘴梁，从城头抛掷出的巨大石块，把城外港湾中的罗马战舰砸沉。另有传说，阿基米德把城里的妇女和老人组织起来，让每人手执一面镜子，将镜面上反射的阳光全聚集到敌航的布帆上，引起了熊熊的大火。3 年后，罗马军队才攻陷弹尽粮绝的叙拉古，罗马士兵用血腥的长矛抵住阿基米德时，这位老人正俯首凝视画于沙地上的几何图而痴迷于科学世界的深思，他愤怒地吼道：“ 滚开些，不要玷污了这幅图！ ”

18 世纪，传说有个法国人用 168 块玻璃反射镜组成一门“ 光炮 ”，显然这位法国人在重温阿基米德的旧梦。每一面镜子长 20 厘米，宽 15 厘米，总面积约 5 平方米，呈半径为 0.9 米的巨型半球面反射镜。有人为此作了计算，这门“ 光炮 ”聚集的太阳光，可于几分钟内将 50 米开外的松木点燃。虽然在实战中这门“ 光炮 ”并不如想象的那样具有强大威力，但是至少可以证明，我们的人类先哲很早以前就在打光的主意了。

二　第八张王牌

可以肯定的是，无论正义战争，还是非正义战争，争战双方都会极力使用最为先进的科技手段研制并运用“ 秘密武器 ”。同样，激光一问世，立即引起军事专家们的高度重视，激光的高定向强光性质使战斗中的武器家族又添新丁。

70 年代，美国的五角大楼产生了一个代号为“ 第八张王片 ”的秘密行动计划，这个行动计划全面展开了激光武器的研究。1972 年，研究者在凯特兰空军基地用激光做打靶试验，激光束能将 1 英里（约 1.6 公里）远，20 英尺（约 6 米）高的一只扑克牌大小的靶机击中。1975 年，已能够用激光束击落飞行中的靶机。1983 年 3 月 23 日，当时的美国总统里根发表了“ 星球大战计划 ”，意欲在外层空间建立激光武器站。在高于 10 万公里的太空站或人造卫星上安装激光炮，或将激光炮置于地面，而在高 4 万公里处设置直径大约 30 米的反射镜，将地面激光炮发射到外层空间的“ 光弹 ”转射到敌方导弹头上把它一下子摧毁。整个计划需要 30 年时间，耗资 3000—5000 亿美元。

前苏联同样以极大的人力财力投入激光武器研制的军备竞赛。80 年代初，前苏联即已经建立了激光武器系统，可以击毁低轨道运行的卫星，用激光武器打击高轨道航天器的研制已成定局。90 年代，氦发射一枚装备有激光武器的人造地球卫星。超级大国即加紧研制反导弹激光武器系统第一系列激光武器，又在常规激光武器的研制上展开激烈竞赛。其他一些发达国家也毫无例外地对激光武器的研制发展寄予了厚望。如英国的一些军舰已经安装了由美国提供的常规激光武器，而且已投入了实战。

三　炸弹的眼睛

现代战争对于武器的命中率要求都相当高，而激光的出现，更使武器命中大大向前推进了一步。当今世界，已出现了激光制导炸背景。激光制导炸弹头部装有 4 个排成十字的激光接收器，炸弹的飞行方向由这 4 个接收器输出的信号控制。当 4 个接收器收到的激光能量趋于一致时，不产生偏差信号，炸弹就按原来的方向跑。如某一个接收器收到的激光能量少了，它就输出一个偏差信号，调整炸弹的飞行方向。

指挥炸弹飞行方向的激光，可以由一架飞机或是地面操作者发射。激光束打在目标上以后，便产生反射，被装在炸弹头部的激光器接收，只有炸弹正对目标时，4 个接收器收到的激光能量才刚好一样，实际上，从目标反射出来的激光束就成了引导炸弹直奔目标的指路明灯。激光制导炸弹之后，科学家们又将目光放到激光制导炮弹上面。有一种被称为“ 铜斑蛇 ”的激光制导炮弹，用 155 毫米大炮发射，射程在 4—70 公里之间，击中目标的误率仅有 1 米，真说得上百发百中了。

四　坦克死光

当坦克首次出现在第一次世界大战的主战场时，人们从这个钢铁的庞然大物身上，看到了它攻防能力是如此的和谐统一，无不为之惊讶！送给坦克一个雅号“ 活动的钢铁碉堡 ”。

1973 年，第四次中东战争爆发，仅在短短的 18 天交战中，双方共投入坦克近 6000 辆，装甲车 9000 余辆，这是世界战争史上规模空前的一场坦克大战。

显赫一时的坦克，并没有因此称雄世界，有人发明了反坦克导弹。反坦克导弹身材矮小，发射器可支在地上，也可扛于肩头，机动性强，操作也十分灵便。就在第四次中东战争中，埃及第二步兵师伏击了以色列王牌——第 190 装甲旅的坦克群。随着埃军指挥员一声令下，一枚枚身长不足 1 米的反坦克导弹，拖着长长的电线尾巴，如一只只矫捷的凶猛同鹰，向以军的坦克群飞奔过去。仅 3 分钟时间，便催毁目标。

可是，这种反坦克导弹有个不可克服的弱点，它的准确性是牢牢掌握在射手的手中。也就是说，导弹射手的瞄准水平将直接影响这些反坦克导弹的准确度。另外，反坦克导弹的那条尾巴，也是一种累赘，如自然环境以及其它一些不可抗拒的因素羁绊住了那条尾巴，导弹也就失去了控制，无法攻击目标了。

激光反坦克导弹的出现，使过去那种拖着长长尾巴的反坦克导弹“ 休息 ”了。激光反坦克导弹的头部装有激光接收器，形如为反坦克导弹装上了明亮的眼睛。交战中，飞机或是地面向坦克发射激光束，激光束从坦克上反射后就被反坦克导弹头部的激光器接收，反坦克导弹紧紧跟踪目标，便能准确无误地击中目标。

五　神奇助手

要准确地测定目标的距离，就需要有既准又快的测距仪。现实生活中，

需要测试距离的地方不少，山川河流，建筑施工，炮兵指挥官测距，还有地球至月球之间的准确距离等的测试，对国防科技，工农业生产乃至各行业中有关距离的测试都非常重要。可是，一般的光学测距仪，还不能较好较准的达到实际需要的精确程度。激光为人们提供了当代最先进、精确的测距手段。

激光具有很高的亮度，一束激光射到距离目标后，反射回来的光强度是以用光电接收器感受出来。同时，采用调 Q 开关或锁模技术，能够把激光脉冲的闪光时间压短到百亿分之一秒。这样，便能够极准确地测出激光脉冲在激光源与目标之间一个来回所花的时间。

地球到月球的距离就是利用激光，才首次精确地测定的。再如，为适应现代战争的客观需要，科研人员还专门为炮兵部队设计了一种激光测距仪。

炮兵部队专用的激光测距仪，有两只可伸出来的望光镜。左面的寻只望远镜用于瞄准目标并发射激光，经过望远镜之后的激光束，平行度进一步得到改善；右面的那只望远镜用于接收从目标反射回来的激光。测距仪在发出激光的同时，也打开了光电接收器，并触发了里面的计时器开始计算。从目标反射回来的激光，进入接收望远镜，光电接收器一接到信号，计时器便停止计时。计时器测出的激光束往返的时间数据立即输入计算器，计算器计算得出的距离的数值由数字显示器显示出来。这一切都眨眼之间完成的。这种激光测距仪的测量距离达 20 公里，误差仅有 1 米，而整台仪器的自重不足 3 公斤。

还有的激光测距仪具有一机两用功能，既能测距，又能起激光指示器的作用。激光指示器既可安装在武器或仪器上，也可携带，用它精确地跟踪指示照明目标，并将激光信息反射给“寻的器”，直至击中目标。这种武器或仪器还可以用来进行夜间侦察或跟踪，用红外激光扫描摄影机可在 500—1000 米的高空拍摄地面的建筑物、汽车、船舶和飞机等，并能准确地分辨出行人中的农民和军人。

激光测距仪的广泛运用，为科技工作者打开了思路，他们从实际需要出发，不断创新，认真总结经验，为人类的军事、工农业及其它行业都大受裨益。

六　无眼之战

比太阳光还要亮几百亿倍的激光，如果直接射向人的眼睛，将对人的视力造成极大的伤害。

激光致盲武器，利用激光束使敌方兵士的眼睛失明或破坏他们坦克望远镜的目视传感器。这种武器通常用于近战，即可手携，又可装在坦克、装甲车或直升飞机上使用。美国陆军已研制成功这种小功率激光武器，用激光束可扫遍半径为 1.6 公里的战场。80 年代中期，美国和前苏联两个超级大国都在许多军舰上装备了这种武器，以防御敌机的近距离攻击。在 50 米以内，这种小功率激光武器可以灼伤敌机驾驶员的眼睛,即使 50 米以外也可造成敌机驾驶员短时间内晕眩而失去对飞机的控制能力，无法有效地攻击目标。

激光束每少钟飞行 30 万公里，事实上当敌人看见对方发射的激光闪光时，便意味着他已经被击中了。激光束进入眼帘，眼球就把光聚焦到眼底。生物学家作过这样的计算，聚焦的结果，使眼底的光功率密度比进入眼帘的光功率密度达到每平方厘米十万分之一瓦，就会导致视网膜损伤。

激光致盲武器不但能杀伤地面部队，甚至可以用来反坦克反潜艇。坦克也好，潜艇也罢，都离不开潜望镜，外界的光线就是通过潜望镜到达坦克或潜艇那厚厚的铁甲里面，到达驾驶员或观察员的眼睛，这就为激光进入铁甲杀伤敌人提供了通道。

激光致盲武器还可以用来使敌人的侦察卫星变成瞎子。侦察卫星之所以能够以高空看清楚地形地貌，完全是依靠它上面安装的遥感探测器——这就是侦察卫星的眼睛。假如用一束激光烧伤遥感器或者破坏它的工作灵敏度，卫星也就成了瞎子。

七　无人区的玩笑

过去进行的军事演习，真真假假，虚虚实实，不管这类军事演习的假想敌方多么神秘，演习的效果总不尽人意。这毕竟掺杂了许多主观成份，终难达到实战中瞬间万变中应有的理想境地。

为了提高军事演习的实战效果，科技工作者们研制了激光模拟武器。飞机、坦克、大炮和其他各种武器都可以装备激光模拟武器，它们能够在原有的射程范围内发射激光。同时给兵士 01 和装备都配上光电接收器，假如在演习中被激光武器击中，接收器的输出信号便引发烟火。激光模拟武器发出的激光强度不大，不会伤人，却足以被光电接收器接收。在演习中使用激光模拟武器，跟实战枪弹射击一样，击中目标后，目标便会产生烟火，表明已受伤亡被剥夺了战斗力。

实际争战中怎样打仗，就怎样练兵。在使用了激光模拟武器以后，真枪实弹的军事演习便可以实现了。比如，战斗机飞临敌方的空城时，将遭到密集的激光炮火封锁，飞行员如无过硬本领，很难逃脱被击中的厄运，因而也就失去了继续参战的资格。地面部队作战的战士如果掉以轻心，也可能很快就会被敌人击中而失去战士作战的起码资格，当然更无胜利者的希望了。

激光模拟武器除了安全可靠，又可追求实战的逼真效果外，还可以大大节省军事演习的庞大开支。比如，一枚反坦克导弹的实际价值上万元，而用激光模拟，发射一发“ 激光导弹 ”的费用则不到它的零头。如果过去一场军事演习要耗资千万元的话，激光模拟武器所进行的军事演习则可以节省成万倍的费用。

八　高能激光武器

高能激光武器主要用于摧毁敌方的飞机和导弹。高能激光武器激光束能使被照射点材料溶化或是气化，从而击穿坚硬的钢板，或是破坏飞机和导弹的重要部件。这种激光武器可以部署在陆地、舰艇、飞机和卫星上，它的特点是神速，它以每秒 30 万公里的速度前进，精确度极高，只要对准目标不需要前置，就可以摧毁对方。燃料消耗也少，用激光可以依靠反射镜来操作，在宽阔的视野内从一个目标转向另一个目标，不会产生后座力，装在飞机上向任何方向射击，对载机的高速运动没有影响。还有，这种激光武器不会象核武器那样，在制造、运输和使用过程中造成可怕的危害和令人寒悚的污染。

我们已经知道，激光是由闪光灯射出挑激发红宝石晶体，然后突然发出一束波长一致的光束业。激光的发射是断续的，所以在传播过程中光波象峰

与峰、谷与谷那样，峰谷相间也重复出现，而且由于光的散发很少，所以细长的光束可以一直传送很远。

目前，激光用途很广，例如医学手术、光学仪、电视录影机、舞台灯光艺术、杀人武器和宇宙太空通讯等都可应用。现在，美国和前苏联两个超级大国，都在利用激光，意欲在太空无血战争中决一胜负。

现在的德国发明的高能激光发射器，将在国内正式投入生产。

根据模型展示，这种高能激光发射器底座象坦克车，燃料槽和激光装置可以迅速移动，而且活动性也强。车顶上装有形如摄影机暗箱的柱，是高能激光仪的上部发振装置所传达的管，由两道屈折臂上下传达。光学照准器和跟踪装置都在头部。这种兵器可以在森林中侦察出敌人的踪迹，它不会象一般电子仪和雷达地样，在近距离中失效。它还可以引导洲际导弹的飞行方向。

九　激光反导弹系统

美国劳雷尔公司（loralcorp.）已经与美国海军签订了价值 480 万美元的合同，这一经费用于开发和研制一套激光反导弹系统。这个系统被命名为多波段、反舰巡航导弹、战术电子战系统（MATES）。这个项目主要目的是研制一套激光红外线干扰系统，使其能够对抗电子制导的反舰导弹。

根据劳雷尔公司的设计构想，MATES 所阐述的概述可能被集成先进的综合电子系统内，进而成为这个公司下一代综合舰载自防御系统。

历时 31 个月的研制项目将在美国海军研究试验所进行。劳雷尔防务系统公司将提供高速信号处理器，操纵控制台系统设计如 MATES 子系统的集成模块。

劳雷尔电子系统公司将负责设计定位和跟踪子系统，劳雷尔航空电子公司承担探视频跟踪器。

此外，美国已在研制中红外小型化学激光器等。

十　潜艇激光通信

激光对潜艇通信的概念，是 60 年代初期提出来的。直到 1978 年，美国国防远景规划局和海军才下决心，正式开始实施激光对潜艇通信的研究发展工作。实施激光对潜艇通信计划有两个主要方案：陆基激光器方案和空间激光器方案。陆基激光器方案的基本构想是，将大功率激光器安放在陆地上，并在地球同步轨道上放置一部可调反身镜。带有信息的激光束自地面发出后，经空间反射镜再转向海面。空间激光器方案的基本构想是，将激光器安装在卫星上，上行线采用无线电通信，下行线就是激光通信。解决这些问题，所涉及的技术相当复杂，其中包括潜艇、激光器、接收机、卫星、水文和气象等各个方面。

1984 年，亚利桑那大学研制了一种原子谐振滤光器。滤光器有效地改善了潜艇水下收信性能，使水下接收的深度增加了数百英尺，将报文传递时间缩短到原来的十五分之一，还可在一定程度上降低对激光器输出功率的要求。而且体积小，更为经济实用。另一方面，氯化氙激光器技术的发展，加之激光穿透浓厚之层与潜航潜艇通信演示的成功，国防远景规划局已确信，激光对潜艇通信的探索方向从陆基激光器方案与空间激光器方案齐头并进的

做法，转到完全集中精力于空间激光器方案。

1985 年 1 月，海军与国防远景规划局签订了一份绝密的协议备忘录，用于指导一项双方联合发展，并于九十年代建成的一套激光对潜艇通信系统计划的实施。1986 年政府为激光对潜艇通信计划的拨款为三千零三十万美元。主要用于洛克希德导弹和空间公司及诺斯罗普公司开发一种适合空间使用的氯化氩激光发射样机；由 GTE 公司及麦克唐纳——道格拉斯公司研制一种适合潜艇使用的原子谐振滤光接收机。曾负责国防 C3l 的美国前国务卿助理莱撒姆曾称，激光对潜艇通信计划与极低频对潜艇通信计划将提供两个“相互补充的系统”。

十一　死光枪

位于新墨西哥州北部的洛塞勒摩斯实验室曾为美国设计第一颗原子弹，为第二次世界大战写下了句号。近年来，它一直在积极研究发展科幻小说中的“死光枪”——中子、分子光束武器。

科学家们用一枚亚力火箭，将一支名为“熊娃娃”的“死光枪”射入 180 公里高的太空轨道中。“熊娃娃”是设计用于太空中光束武器的一部分，是这种武器的“迷你型”。正式用于战争的“大熊”体星，达 100 吨。这只迷你型“熊娃娃”是人类在太空中首次试验的分子光束武器，也是美国太空武器技术获得重大突破的第一块里程碑。如果一切顺利的话，“熊娃娃”不但能侦测出所设定的敌人进攻的武器，并可立即以死光予以摧毁。

飞行只有 8 分钟的“熊娃娃”的死光将做多次试射，试射距离从 200 米到 8 公里不等，如果是重达 100 吨的“大熊”，其光束可射至几百里之遥。

当然，只有“熊娃娃”在地面上测试完美无缺之后，才会让它飞上天露一手，但即使用最精确的模拟操纵装置，科学家们也无法确定在火箭飞行的稀薄大气中，光束到底能射多远。短暂的 8 分钟试射结束后，对有关“熊娃娃”飞行及发射光束纪录资料的分析和研究至少要耗时 8 个月，方能理出头绪来。

洛塞勒摩斯实验室将投资 5 亿美元以上，装置“地面测试加速器”，预定 1992 年内得以完成，然后再用两年时间兴建高密度坚固的外层建筑物。全部工程将于　1984 年落成，体重达　100 吨的“大熊”便安置其中。一旦侦察到前苏联的洲际飞弹袭来，“大熊”立即凌空拦截并将其摧毁于太空之中。

死光枪已从科幻世界步入外层空间作战的行列，由此证明，人类的幻想是多么奇妙，又是多么地令人为之惊诧。科学之于人类，有着无可比拟的力量。

十二　星球大战·X 光镭射

李维摩尔主持 X 射线镭射的负责人乔治·查布莱说：热、光、电力或是化学能都可以做为镭射的能量来源，但困难的是将这些能量打入能发出镭射光的材料内，促使材料内的电子逆向。在一般未受激动的原子中，大部分的电子都在低能阶状态，只有少数电子在高能阶。镭射的构想就是以打入的能量将原子内的电子分布作“倒转”，使镭射材料中的绝大部分电子窜向高能阶，留下大批的低能阶空位，经由适当的触发信号，即可使大量的电子降落

在低能阶，而以光子的型态放出巨大的能量。

就大多数镭射而言，能量的放射与能量的供给足以同步，但 X 射线镭射却太难了。它的电子降落速度实在太快，快到一般实验室所能提供的能量突波亦无法追上，而李维摩尔实验室的人员真的办到了，他们所用的是——核子弹。

美国空军曾以化学镭射及其他的镭射在近距离成功击落了无人驾驶飞机，为什么李维摩尔实验室还要大费心血去搞 X 射线镭射呢？简言之是看重它的能量威力，在其他波长较长的镭射如想摧毁来犯的飞弹，须花费相当长的驻足时间盯住该飞弹表面的某一点，直到该点熔穿为止，但 X 射线镭射纵使经过极长的距离，它也可以自身巨大的能量，将飞弹的外壳整个爆炸性的挥发掉，以其巨大的震波，将飞弹的重要部位如下雨般的解体。

专家们估计，光是镭射物质的一个原子即可产生一整瓦的镭射能量，如果一个小小容器能容上兆个原子，其威力实在万分惊人。

X 射线除能量大而外，还有另一些特点。X 射线镭射不需光学设备，它们和射线散失度超乎寻常的小，将镭射材料做成小小的筒状安插在核子弹的外表，每个都可独立地对准目标，一旦有事，引爆核子弹，以其能量发射镭射，直到整个机构沦为爆炸的火球为止。

所有的镭射在大气中效果都不佳，如可见光一般，可被空气中的水气及灰尘阻隔或是散射，也可以烟幕障蔽。X 射钱镭射另有一个缺点，它比其他镭射更易为空气分子所吸收，所以只能用于太空。

十三　死光终结者

激光武器的出现，立即伴随着研究反激光武器的方案推出。制服激光武器，便是根据光的特性找出它的弱项，人们大致从以下几个方面考虑，研制反激光武器的办法。施放烟幕。光束传播过程中，如遇尘埃，便会发生散射。人站在光束无法照射的地方，同样能看见从窗外射入的光束，还能清晰地看到光束中纷扬的尘灰，这是因为光束发生了散射。如在激光制导的导弹飞行轨迹上施放浓浓的烟幕，使激光发生强散射，起制导作用的光信号强度随之产生衰减，制导能力大大降低。导弹便会偏离甚至失去目标。

施放诱惑光束。对付激光制导导弹，可用一束波长和脉冲方式都与敌方制导的光束相同而强度更大的激光束去扫描飞来的导弹，诱使导弹跟随这束干扰光束跑，放弃本来将要攻击的目标。

发射致盲激光。在激光浊距仪、激光雷达及激光制导导弹上，均装有光电接收器，用来接收从目标反馈来的信号。如用一束很强的激光束扫描它们，使它们上面安装的光电接收器在强光作用下超出了额定的峰值，也会无法正常输出控制信号。

反对抗。为了防止假的激光信号干扰，可将制导用的激光信号编码，这样，光电接收器在收到信号时，便可查验信号编码的真伪。

现在，西方国家普遍使用防止激光武器伤害的方法，大致包括遮断激光光束照射、改变士兵在战场上的目视习惯如采取反制措施：

滤光器的发展和运用。激光器作用，旨在过滤照射眼睛和感测器的强光，从而避免肉眼与光学器材的损害。战场上观察敌情的能见度非常重要，通常受到烟幕、气象及地形地貌地物等的影响，所以既看不远，又不确实。现在

需要全本请访问 www.ertongbook.com