

## 綜 合 評 述

# 激光武器及大能量激光

沃新能、李逸峰、王克武

### 一、激光武器问题的提出

从激光一出现，许多科学家就预言激光作为武器的可能性，特别谈到激光作为反弹道导弹手段的可能性。

从激光所具的特性来看，它是最理想的反弹道导弹武器(触发快，并以光速出击，故无须甄别导弹及引饵)，如果地面伺服系统得以解决的话，从某种意义上来说，“激光武器”的优越性较大。就以美国目前研制的反导弹系统奈克Ⅲ而言，在击毁 100 公里高度以上(即在导弹进入稠密大气层的区域附近)的洲际弹道导弹，命中率约为 0.25，若要使命中率为 0.7~0.9，则对同一目标，就必须发射 4~6 枚反导弹的导弹，显然如果辨认错误，奈克Ⅲ就完不成任务；而目前微波雷达还难以分辨出在这样高处的较小的导弹头与引饵。因此美国以及其他国家，都紧张地研制激光反导弹系统<sup>[1]</sup>。

关于激光是否能作为反导弹武器是有二种完全相反的意见的。一种是否定的意见，以瑟林(H. Thirring)<sup>[2]</sup>为代表；其总的意见为：(1)熔解导弹弹头所需的功率，以导弹重 100 磅计算，约为 11,575 千卡(=62,500 BTU, =13.45 千瓦小时)，如在 50 公里高度处、1 分钟内将导弹摧毁，需功率  $807 \times 200 = 161,400$  千瓦(=  $1.614 \times 10^8$  瓦)。若与当时光激光器所取得的毫瓦功率水平相比，差 11 个数量级——激光强度远不足以达到摧毁导弹的程度(这些估计均是根据 1963 年以前的数据提出的)。(2)欲以束宽 1 分的光束命中几十公里高处急驰的微小目标将是极困难的事。(3)可以用非常简便的方法，防止激光的破坏，如采用高反射手段等等。(4)如在地面对高空导弹进行防御，还有大气对激光衰减的障限无法排除。(5)如采用空中激光防御系统，则估计极庞大的能源系统无法带上天空，等等。

另一种是肯定的意见，认为用激光对付导弹原则上是可能的，然而在现有的技术水平上是不现实的，以激光目前发展速度来看，预料在今后 5~10 年内或更长些时间内会成功。就目前水平来看也存在以下二个问题，有待解决的：(1)如何产生足以摧毁导弹或破坏导弹道的巨大的脉冲能量或巨大的连续辐射功率。(2)如何瞄准和跟踪导弹。将大强度激光射到高空的导弹上击毁目标(其中应包括解决大气衰减问题)<sup>[3]</sup>。

不论是肯定的意见或是否定的意见，都存在着：（1）作为反弹道导弹的手段，究竟需多大强度的激光输出，有否可能实现，如何实现。（2）如能用激光来进行反导弹，用什么方法进行瞄准和击毁导弹。（3）如何解决大气衰减和气流折射问题。

## 二、激光武器所需大能量输出的估计

有人认为，作为反洲际弹道导弹，利用激光将导弹摧毁，需激光的输出能量达  $10^9$  焦耳以上。一旦这一目的得以实现，就相当于在热核武器技术上的一次突破。

我们也曾根据瑟林的观点，对 100 磅重的导弹头，高度 50 公里，以目前光激光器技术上可能达到的输出角为 1 弧秒来计算，如不计及大气衰减及大气流动、散射等影响，则激光输出能量达  $3 \times 10^7$  焦耳，就足以将导弹全部熔化；如激光能达到这一水平，其威力在某种意义上说，相当于第一颗爆炸的原子弹（以同一立体角内的辐射能相比较）<sup>[4]</sup>。如以地面激光反导弹系统来考虑，则还必须计及激光的大气衰减等问题。

激光通过大气的传输方程为<sup>[5]</sup>：

$$F_T = 4Et / \pi (R\theta)^2 \text{ (焦耳/单位面积)} \dots\dots\dots (1)$$

$$t = t_0 e^{-dR} \dots\dots\dots (2)$$

此处  $E$  为发射的激光能量； $t$  为大气透过系数（对激光波长的）； $R$  为目标物距激光系统的距离； $\theta$  为发出的辐射束宽； $d$  为吸收系数。透过系数是最重要而恰恰又是了解得最少的参数；如果估计进大气衰减，并以透过率为 1% 计算，则输出能量为  $10^9$  焦耳时，导弹上所受到的激光能量密度约为 0.5 焦耳/平方厘米，这样还不足以把导弹摧毁；看来利用激光热辐射来摧毁导弹所必需的能量，应为  $10^9$  焦耳以上。

那末究竟目前激光输出的能量水平是多少？通过哪些途径来实现上述的大能量呢？

## 三、激光大能量输出的若干问题

国外对大能量输出器件的研究，始终是极其保密的，公开发表的数据，往往落后其现有水平一、二个数量级，而且实验装置与设备等根本不公开发表。下面仅就所搜集的情况作一报导和稍加分析。

### 1. 目前大能量输出水平的几种说法：

(1) W. H. Huntley, Jr., *Missiles & Rockets*, 1965, 17, № 9, 10 **BA**

根据公开文献所载数字（显然其中并不包括军事部门的成果）估计，目前最大的单脉冲激光能量已达 6,000 焦耳的水平。

(2) B. Kovit, *Space/Aeronaut.*, 1963, 40, № 5, 76

雷瑟恩的波谢奈耳小组正在完成一种设计，从红宝石晶体可望获得 4,000 焦耳的输出。

(3) J. L. Walsh, *Signal*, 1965, 19, № 12, 48

已有输出 2,400 焦耳的钎玻璃光激光器。钎玻璃光激光器的长脉冲增量效率已达 5% 左右。

(4) 难波进, *电子材料*, 1965, 4, № 10, 13~18

据难波进 1964 年 4 月 23 日至 5 月 28 日及 1965 年 3 月 31 日至 4 月 25 日二次到美国进行调查的结果:

联合飞机公司的德默里厄 (Demaria) 正在准备大能量实验。

难波进看到了输出能量 20 万焦耳的电容器, 及充电电源, 有一大电感, 其面积约占一间房间。

其最大输出能量估计可能为 3,000 焦耳。所用工作物质为掺铍玻璃棒, 磨制成两端具布儒斯特角窗式, 直径为 10 毫米, 长 1,000 毫米, 用二根直管氙灯激励。反射器为铝箔, 玻璃棒用水冷却, 同时解决了氙灯中紫外辐射对玻璃棒着色所引起的劣化光学质量问题。

(5) E. Snitzer, *Quantum Electron.* III, 1964, 999~1019

输入能量 2,000~6,000 焦耳, 最大输出能量——145 焦耳, 所用材料为掺铍铟玻璃, 棒体积 13.5 立方厘米, 单位体积能量密度 10 焦耳/厘米<sup>3</sup>, 能量转换效率, 在输入高于阈值时, 为 3.9%。

(6) *Вестник АН СССР*, 1965, Вып. 1, 37~41

在一般情况下, 获得能量为 1 万焦耳的脉冲输出(脉冲持续时间为 1 毫秒)是没有原则上的困难的。

## 2. 几点分析:

(1) 根据这些零碎的报导, 可以看出, 国外(特别是美国)目前输出能量水平决不止 6,000 或 10,000 焦耳, 可能已达比上述数据高一个数量级, 或更大些。

(2) 以单棒试验来说, 美国已报导的数据中, 估计最大的输出能量密度约 38.2 焦耳/厘米<sup>3</sup>(难波进的报导), 单位面积负载 3,820 焦耳/厘米<sup>2</sup>, 效率 1.5%。就依据这一数据来估算, 要想达到 10<sup>9</sup> 焦耳的输出, 需工作物质 3 × 10<sup>7</sup> 厘米<sup>3</sup>, 这意味着如果一切按简单的算术关系计算, 用直径 20 厘米的铍玻璃棒需长 1,000 米, 每平方厘米的能量负载约 3 × 10<sup>6</sup> 焦耳, 这显然是不可能做到的。如果加大棒的直径, 并将几十根甚至几百根棒并联使用, 同时提高工作物质的质量, 从而提高单位体积的能量密度或许还能解决这些问题。

(3) 根据目前这种低效率(1.5~5%), 要达到 10<sup>9</sup> 焦耳能量输出, 所需能源的输出能量为 5 × 10<sup>10</sup>~10<sup>11</sup> 焦耳。曾有过粗略的估算, 目前光激励器能源系统的重量系数约为 0.1 焦耳/磅, 则 10<sup>11</sup> 焦耳, 其重量约为 10<sup>12</sup> 磅 ≈ 5 × 10<sup>7</sup> 吨。因此提高效率, 改进能源的质量, 增大其重量系数是十分重要的。

(4) 用目前已有的光学泵浦来激励工作物质, 总效率很低, 要想增大总效率、大幅度提高输出能量, 光靠增大工作件的尺寸, 扩大储能机构, 显然是有问题的。

## 3. 几点想法:

(1) 前面谈到了, 目前的大能量转换效率较低, 体积庞大, 但是在还没有更好的大能量工作物质出现之前, 现有的二种大能量工作物质(铍玻璃和红宝石)还是很重要的。国外目前报导铍玻璃的情况比较多, 并已有报导用敏化机构的方法来部分地解决有效利用激励光源的问题; 如玻璃中双掺杂 Nd<sup>3+</sup> 及 Mn<sup>2+</sup>, 结果提高现有输出能量的 35% 左右。众所周知, 玻璃工作物质能够制备较大尺寸的激光棒, 故解决大能量的问题比较现实, 不过玻璃中气泡、

杂质引起炸裂的问题，尚待解决。应该继续寻求新的基质玻璃，以便能具更高的能量密度、更高的单位面积负载能量、更高的质量、更高的转换效率。有人提出用高矽氧玻璃或石英玻璃，但是这两种材料的光学质量，在现有技术水平下，恐很难做到合乎要求的程度。

关于红宝石的情况，只能说近来国外没有确实的数据报导，从旁证材料来看，并未否定其作为大能量工作物质的前途，恰恰相反，有报导，国外已在进行用恰克拉斯基法拉制高质量、大尺寸的红宝石棒，并已有初步结果(现在所用的 Verneuil 法制成的红宝石存在着应力较大、化学成分不均匀性、位错 Tyndall 散射、折射率不均匀和光轴扭转等缺点)。如果能解决这些问题的话，那末红宝石的单位体积能量密度比铍玻璃高，单位面积的能量负载也比较高，转换效率也高；曾有人认为，优质红宝石棒的转换效率可达 8~10%。<sup>[5]\*</sup> 并且其荧光光谱很简单，晶格结构很坚固，化学稳定性良好，是很理想的大能量工作物质。此外似乎也寻找双掺杂敏化机构的方法来解决红宝石充分利用光源的问题。

(2)改进现有光源的问题，也是很重要的，早就有过计算，利用现有的氙灯，其发光效率为 60%，且灯输出后的能量转换效率又很低，绝大部分的能量变为无用的热能而消耗了。就算转换效率很高，灯的发光效率以 100% 计算，那末要供给输出激光能量为  $10^9$  焦耳的光泵本身，其制备技术问题就很大，同时灯在强脉冲放电过程中，所产生的冲击波和灯泡壳皮过热引起的损坏将会无法避免。曾有过各种建议<sup>[4]</sup>，设想取代氙灯，其中值得提一提的有：  
①化学光源——主要有二种，一为利用化学反应发光的烟火光源，一为冲击波光源，其特点在于不需要庞大的储能系统，便于携带和载运。据估计一公斤重的化学光源所输出的能量，相当于重 25 公斤的氙灯输出能量，这种光源既能有很高的亮度，又有足够的强度，可以调整光源的光谱分布，适合于光激励器的主要吸收光谱区，但是尚有许多技术问题有待进一步解决。  
②核能激发光源——利用核能作激励源已有过报导，由于机构复杂，且有一定危险性，研究报导也少。但是将核能直接或间接转换为激光能这件事本身就很值得注意。据报导<sup>[6]</sup>，美国正打算用核反应堆作为输出十亿焦耳激光的激励源。  
③磁流体光源<sup>[7]</sup>——最近实现了用 450 克  $C_4$  成分炸药驱动  $6 \times 8$  吋磁流体通道，产生 300 兆瓦、持续时间 200 微秒，或能量为 60,000 焦耳的一个光脉冲，正在研制脉冲输出一百万焦耳，持续时间 1 毫秒的光源。目前这种机构的转换效率还很低，已在研制提高效率的方法。

(3)从上面这些情况看来，问题颇为复杂，人们不禁会提问，为什么不采取更为直接了当、而不经几次能量转换的办法来解决大能量激光输出的问题呢？例如半导体光激励器，由电能直接转换为激光能的效率高达 70% 左右，机构又简单，所可惜的是半导体的尺寸太小，输出能量太小，发散角又比较大。有没有可能设法制备大尺寸的半导体激光器件呢？除此而外，能否利用化学能，或电能直接转换产生激光能呢？已有报导谈及 InSb 半导体光激励器可能作成大尺寸光激励器，但是不改变目前结区受激发射的局面，恐难获得大能量输出。关于化学光激励器已有初步结果，据报导已经成功地获得氢和氯化合成盐酸时发出激光，增益也比较大，可达 106 分贝/米<sup>[8]</sup>，这方面的研究才开始，还待今后的发展。

\* 这一值不是指总的能量转换效率。

#### 四、获得激光大能量的其他途径

上面所述的情况，给人一种印象，要实现作为激光武器的大能量输出，颇为不易，并且目前似乎还无有效办法去解决提出的一些问题。

除了固体脉冲器件外有否其他途径呢？

1. 虽然目前利用 Q 突变技术，解决了高功率脉冲输出的技术问题，最大脉冲功率，据报导可达 10 千兆瓦<sup>[9]</sup>，但是平均功率很小，要用来摧毁导弹恐怕有很多困难，一时也难以实现。

2. 最近出现了一种新的现象，是连续运转的光激光器输出功率水平大有提高：(一) 固体方面——掺钕钇铝石榴石光激光器，用氩弧光灯激励，产生连续输出 40 瓦的功率，据报导，不久有可能提高输出达 100 瓦<sup>[10]</sup>；在钇铝石榴石中进行双掺杂（如掺  $\text{Cr}^{3+}$ ， $\text{Nd}^{3+}$ ； $\text{Ho}^{3+}$ ， $\text{Er}^{3+}$ ； $\text{Tm}^{3+}$ ， $\text{Er}^{3+}$  等）已获成功，并且效率也较高<sup>[11]</sup>。钇铝石榴石主要的问题是目前不能制成大尺寸，并且质量也不好，如解决了工艺制备问题，是一种极为良好的大功率连续输出的工作物质，并且很有希望用来作为激光武器的材料。(二) 气体方面——(1) 氩气体激光器，1965 年 4 月连续输出功率报导已达 25 瓦，估计达 1,000 瓦连续输出应无困难<sup>[12]</sup>。(2)  $\text{N}_2\text{-CO}_2$  激光器，输出波长为 10.6 微米，正好落在 8~14 微米的大气窗口范围内，连续输出功率最高已达 11.9 瓦，效率达 4%，而且研究方开始，很有发展前途，此外用此波段的激光作为地-空反导弹系统极为有利。

据此，是否可用连续运转的器件来作激光武器呢？好象问题并不比脉冲大能量者小，且连续运转还存在散热的问题，也颇难解决。从已有水平来看，气体似乎值得注意。但总的来说，利用连续器件作为激光武器，问题并不比脉冲大能量激光器件简单。

3. 1964 年就有人提出激光位相列阵问题<sup>[13]</sup>，原则上激光位相列阵与功率较低的射频列阵相近似。所提出的每个激光阵需一台高度稳定的主振荡器、功率分配器、电子控制移相器和输出放大器。尽管激光列阵所存在的问题很多，但激光列阵仍然是最实际的方向。当单个光激光器功率增加时，其输出的方向性和相干性便降低，用激光列阵可恢复大功率性能的两个方面：(1) 许多输出优质光束的小光激光器可以产生等值的功率；(2) 大孔径列阵可产生远比单个激光窄的光束，更重要的是列阵的总输出功率可比组成列阵的每一单元的单个光激光器大几个数量级。同时此种装置的单束和多束光可用电子仪器高速精密控制，这类装置还具有自聚焦的适应能力。

激光列阵可作二种应用：(1) 精密跟踪——用它获得的光束宽度和稳定性，可立即改善普通激光雷达。(2) 定向能量发射——即所谓“死光”。

迄今为止，所报道的激光列阵都是  $10 \times 10$  的，并已获得初步结果。据计算，一个  $10 \times 10$  排列的列阵，能产生一个束宽为 0.6 秒的光束，并且能在 1 度内转动<sup>[14]</sup>，而且扫描速度足够在大多数场合上应用。

正因为激光列阵具有上述这些特性，必然为军事部门所重视。美国至少有七个单位进行研究。某些专家预言，要使大规模激光列阵进行工作，还得四年或更长些时间。

4. 此外应该对超亮度的自发发射和自发激光<sup>[15]</sup>给以重视。因为它有可能给出能量比较大的相干光或非相干光。

## 五、实现激光武器的系统设置问题

在前面曾归纳过，激光反导弹武器，除要求有很大的激光辐射能量外，还存在如何瞄准和击毁导弹的问题，为此建议各种系统：

(一)地面系统——如果激光反导弹系统是装在地面基地上，则它应该包括一个捕获导弹中心，中心具有预警雷达，微波跟踪雷达，用以预报来犯导弹的粗略位置；还具有校正激光雷达，使之精确跟踪导弹和测出导弹方位与飞行速度；激光计算机将测得的信号进行快速计算；并将指挥激光武器，对导弹进行射击。敌我飞行器识别系统，以免误击我方导弹。如果能够解决长距离复聚焦系统，使激光武器能有足够能量射击导弹某一点，不一定要彻底烧毁导弹，而只需将导弹体内重要的支架部分烧穿一个洞(即使很细小)来瓦解导弹。也可以局部破坏导弹外壳的完整性及其控制器，造成震动，破坏导弹的弹道。这样即使估计进大气衰减等问题，激光输出能量也不一定要大到 $10^9$ 焦耳数量级，可能小些。但是长距离复聚焦系统设计是很困难的。当然也可以设置成千上百个激光反导弹系统，进行配合作战，将光同时集中到同一目标上，那末，不用长距离复聚焦系统，也可达到同一目的。

在这里必须提一提关于大气风暴所引起的大气层折射变化，从而引起的激光偏向问题，这一问题实际上是很难解决的问题。在激光定位实验中已遇到这一问题<sup>[16]</sup>。但是必须肯定，矛盾已经提出来了，困难出现了，但是与矛盾和困难同时诞生的将是解决矛盾和克服困难的办法。

(二)置于高山的系统——为了减小大气衰减的损失，曾建议将激光武器装置到2,000~3,000米的高山顶上，该处的空气密度较地面小得多。但是即使有这种基地，它也易被察觉，敌方易采取反措施。不但其目标易于暴露，还由于在激光天线阵前有相当大的空气电离。为了抵消此种极易被探测的电离空气现象，已有研究，在天线表面上采用惰性气体(如氩、氦或其他)等措施。

(三)置于卫星或飞船上的系统——光激光器可以列阵方式装到宇宙站上，使其杀伤打击力量可以囊括地面上一块预定的扇形空间，而且这种反导弹系统无后座力，因而不会改变宇宙站的位置或姿态稳定性。

据报道<sup>[1]</sup>，美国国防部在1963年12月10日发表“287号计划”，根据这项计划美国预计在1967年将载有二名乘员的MOL宇宙实验室送上轨道。并以此为基础，设计运载24人的宇宙站，这一计划约在1970年可以实现，并借助于光学设备、红外线、紫外线和无线电侦察设备，对敌方的领土进行战略性侦察。侦察的主要任务为发现洲际弹道导弹阵地。宇宙站并配置激光武器，以击毁进攻宇宙站的导弹和截击任何飞行弹道段的洲际弹道导弹。

也有建议由地面来控制装置在宇宙站上的激光反导弹系统，这就需要解决地面控制的一整套伺服系统，和地面上装置一样，此外还须装备遥控系统，指挥激光反导弹系统能迅速而准确地出击。

## 六、其他设想

(一)有人认为真正的“死光”不只具有辐射热效应，虽然死光可能包含有次级的热效应，但按“死光”的含义，它根本不是依靠将烧灼性的热，注入有生命的物体、电子学电路或其他无生命的目的物或结构中，据推测，“死光”还包含与目标之间的破坏性的共振效应或拍效应，例如，当目标本身是电磁辐射源时，就可能发生拍效应。也可能具有其他效应。因为从有人类历史以来，尚无人研究过如此强大的强光光学，有许多问题和现象尚未被揭开，也有许多现象和效应尚未被发现和认识，故究竟“死光”包含些什么意义是不清楚的。例如最近曾发现，用巨脉冲激光在透明金刚石晶体中获得目前尚不知其作何用途的超声波(300,000兆/周)<sup>[17]</sup>，而这种现象只有在巨大功率脉冲出现后才能呈现这类前所未有的现象，又如在巨脉冲激光作用下，空气中产生强大的电场100兆伏/时等等。故是否必需把反导弹的激光系统输出能量增大到 $10^9$ 焦耳呢，或是不止 $10^9$ 焦耳呢？在这样大的输出能量下将会出现什么现象呢？目前确实还难以估计。

(二)研究X射线激光或 $\gamma$ 射线激光是很重要的，这种光束本身的穿透力极强，其破坏性也极大，如实现这类射线的激光，就是说将穿透力极强的光束聚集在一很小的立体角内，其强度又如此之大，则其威力足以摧毁一切物质。由于激发能量与波长三次方成反比，故波长越短的激光，越难实现，而且在X线范围内，激发能级的寿命是很短的。据估算，要实现X线受激振荡，需要一秒钟内，扔下 $10^{33}$ 粒子数/厘米<sup>3</sup><sup>[18]</sup>，这显然很困难。

(三)有人提出以人工球闪电或称人工雷，与高能粒子流作辐射武器，以反击导弹，而这种人工雷，很可能在空气中产生强大的激光，故雷电似乎具有激光性质，但迄今这类研究尚未超出实验阶段并且尚无任何结果。<sup>[19]</sup>

(四)利用激光武器来作地面上杀伤人或摧毁地面目标，似乎并不很有利的，也不很有效。但最近国外有大量文献报导关于防护激光损伤眼睛的问题。据报导，几乎没有一种激光不损伤眼睛的，并且所造成的损害将是永久性的。这一事实值得引起注意。

## 七、结束语

从事激光武器的研究，不只美国在进行(即便在瑟林等人提出反对的意见时，美国也从未放松过研究激光武器)，近二年才英国、法国也在加紧研究激光武器。最近据日本“防卫日报”1965年9月21日报道，日本防卫厅技术研究本部根据陆、海、空军参谋部提出的要求，正从事激光及其应用的研究，该部研究的激光，用于定位、搜索、跟踪、通信、导航以及毁灭性武器等方面。激光可用来作为反导弹武器这一看法，目前是比较肯定的。而且各国重点解决的关键问题，也都放在输出大能量上。而目前各国对提高固体大能量器件的输出正在加紧研究。解决激光反导弹武器的大能量输出，目前存在许多困难问题，但是要作为激光反导弹武器的大能量不是不可能的，只是时间问题。此外围绕着激光反导弹系统，还在进行着一系列的研究工作，其中包括：其他可能产生大能量激光的器件，激光测距、激光定位、激光跟踪、激光计算机、激光制导系统、遥控、能源系统等等。

重复一下, 激光武器是有可能实现的, 但决不是轻而易举的事。激光从开始到现在不过五年多时间, 但其发展速度是科学史上所罕见的, 上面提出了实现激光武器一大堆问题和困难, 但在技术高度发达的今天能解决这些问题的。问题提出来了, 解决问题的办法也会应运而生。激光的今后的发展肯定会更迅速, 会不断出现新的结果。

## 致 謝

在本文收集材料、整理资料等工作中, 陈嘉华同志和郑秀云同志给以协助, 特此致谢。作者们对上海科技情报所一室蒋贻源同志给以资料的提供以及在写作过程中提出的宝贵意见, 在此表示谢意。

## 参 考 文 献

- [1] *Вестник Противовоздушной Обороны*, 1964, № 10.
- [2] *New Scientist*, 1963, 18, No. 343, 595—596.
- [3] Sy Vogel and Leon Dulberger, *Electronics*, 1961, 34, No. 45, 81—85.
- [4] 沃新能、黄永楷; 《科技文献与情报》(内部刊物)1965年第2期1—6页。
- [5] B. Kovit, *Space & Aeronautics*, 1963, 40, No. 5, 76—81.
- [6] 三户左内, 《电子科学》, 1965年, 15, No. 1, 81—92.
- [7] *AW & ST*, 1965, 82, No. 26, 85—87.
- [8] *New Scientist*, 1965, 26, No. 437, 35.
- [9] *Missiles & Rockets*, 1965, 17, No. 9, 10.
- [10] *Missiles & Rockets*, 1965, 17, No. 12, 31.
- [11] 难波进, 《电子材料》, 1965, 4, No. 10, 13—18.
- [12] *Electronics*, 1965, 38, No. 8, 17; 《科学新闻》1965, No. 1096, 3.
- [13] M. Meisels, *Microwaves*, 1964, 3, No. 3, 6—9.
- [14] *Electronic Design*, 1964, 12, No. 5, 4.
- [15] *Electronic News*, 1965, 10, No. 476, 5.
- [16] H. H. Plotkin et al, *Proc. IEEE*, 1965, 53, No. 3, 301—302.
- [17] *Electronic News*, 1965, 10, No. 487, 1.
- [18] A. M. Прохоров, *УФН*, 1965, 85, №4, 599—604.
- [19] V. Krasnov, AD 287725; 苏联《红星报》1962年7月12日第3页。