

光子机械

翁兆恒

摘要：本文论述了光子机械的基本内容，包括：1. 光子力及其功能；2. 光子的功能产生；3. 光子引擎；4. 光子的功能存储。其中有的已经实现并得到应用，有的目前还是工程上的设想。光子机械是应用光学中一个新领域，应当引起足够的注意。

一、引言

光子机械 (Photon Machines) 这一概念是 W.H. Christiansen 及 A. Hertzberg 在 1972 年研究 CO₂ 气动激光器的性能时提出来的^[1, 2]。顾名思义，光子机械主要是研究辐射能和机械能的相互转换。对于光子机械的研究内容，上述作者在他们的文献中提出了三个设想：1. 光子发生器；2. 光子引擎；3. 光子容器（即光子存储器），并从运动学的观点对三个问题进行了热力学分析。近十年来，两学者及其它专家围绕这一领域进行了一定的研究，如太阳能泵浦的功能激光器，激光发动机，空间电子储存环^[3]等，他们还致力于把研究应用于空间动力传输，先后提出各种方案，如 LPTSI—5 型^[4]。

但是，从广义的观点来看，光子机械是以光子力及其功能作用为依据的。因此，有相当数量的光学效应，如光浮悬^[5]，光偏转^[6]，光致冷^[7]，自由电子激光^[8]，激光加速^[9]，激光产生超声波和激光产生引力波^[10]等，都属于光子功能效应，因而都可以归入光子机械的研究范畴。本文将给光子机械一个统一和系统的描述，并预见其发展。

二、光子力及其功能

光子与其它物质的相互作用，从本质上看是属于电磁相互作用。当光子作用于不同类型的物体上时，将形成各种不同的作用力。总括起来有下列几种力：

1. 罗伦次力

从光的电磁本性看，光是一种横向电磁波，它有与传播方向垂直的电场分量和磁场分量，因而当光作用于荷电物体上将产生罗伦次力（电力和磁力）：

$$F_L = e\vec{E} - ev \times \vec{H} \quad (1)$$

但根据电磁理论，只有光的电场才能产生功能作用。由于光电场是随时间周期改变的，因此，它作用于带电物体时，往往是使荷电物体围绕平衡位置作机械振动。我们在后面将看到，在一定条件下，荷电体的这种机械振动可以由其平动转化而来。光的罗伦次力是所有下面研究的力的根源和依据。

2. 光子压力

从光的粒子性来看,光子不仅具有能量 $h\nu$,而且具有动量 $\frac{h\nu}{c}$ 。因而,当光子作用于任何物体上而被吸收、反射或散射时产生光压,其大小正比于单位时间的光子数 n 及其动量,即

$$F_p \sim n \frac{h\nu}{c} \quad (2)$$

利用光压,可以使直径10微米左右的无损介质小球在地球重力场中悬浮起来或受到比引力大 10^6 倍的加速。

利用光压可以使原子束或分子束发生偏转。

3. 自发散射力

当一束光作用于原子或分子上时,由于光压的作用,以及感应吸收和自发辐射之间的不对称性,将派生出一新的作用力,叫自发散射力,它的大小等于原子在单位时间自发散射的光子动量数,因此它具有和(2)式完全相同的形式,只是式中的 n 与原子的感应吸收概率和自发辐射概率有关,对一个二能级系统,从解速率方程可求出^[6]:

$$n(\nu) = \frac{1}{\tau} \frac{P(\nu)}{1 + 2P(\nu)},$$

式中 τ 为上能级寿命, $P(\nu)$ 是感应辐射几率与自发辐射几率之比,它是吸收截面,光强和线型因子等的函数。把上式代入(2)式就可以得到自发散射力的表式为:

$$F_s = \frac{1}{\tau} \frac{P(\nu)}{1 + 2P(\nu)} \cdot \frac{h\nu}{c} \quad (3)$$

自发散射力有三个特点:①,力的方向与光波的传播方向一致;②,力的大小与上能级的寿命、光强及压力等有关;③,具有饱和性质,即当 $P(\nu) \gg 1$ 时 $F_s \rightarrow$ 常数。

自发散射力的主要功能作用在于它能减少或增加不规则运动原子或分子的平均动能,是激光致冷的依据。

4. 偶极梯度力

原子或分子在辐射场中被极化而形成偶极子,由于偶极子的两端带相反电荷,它们在梯度电场中受力方向相反,但大小不等而形成力差。因此,偶极梯度力的大小为^[11]:

$$\begin{aligned} F_{d,g} &= (\vec{e} \cdot \vec{\nabla}) \vec{E} = (\alpha \vec{E} \cdot \vec{\nabla}) \vec{E} \\ &= \frac{1}{2} \alpha \vec{\nabla} E^2 \end{aligned} \quad (4)$$

式中 \vec{e} 为感生偶极子, α 为原子或分子的极化率, E 为光电场强度,

$$\vec{\nabla} = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}.$$

考虑到原子极化率是场强的函数,并具有色散效应。对高斯光束可导出^[16]:

$$F_{a_r} = h(\nu - \nu_0) \cdot \frac{4r}{D} \quad (5)$$

式中 D 为高斯光束的有效直径, r 是离轴的距离, ν_0 为原子的共振频率, ν 为光频。

由 (5) 式可看出: 如果 $\nu > \nu_0$, 原子受向心力, 反之受离心力。对于轴上聚焦的情况, 相对于焦点, 也有类似的结果。另外, 对于运动中的原子, 在 $\nu < \nu_0$ 时, 原子所受的偶极梯度力指向场强的方向, 在 $\nu = \nu_0$ 时为零, 在 $\nu > \nu_0$ 时则指向场弱的方向。

利用偶极梯度力和自发发射力, 可以捕获原子, 并把它约束在有限空间区域内。

5. 光子密度梯度力

类似原子在 EM 梯度场中所受的偶极梯度力, 自由电子在 EM 梯度场中也同样受到梯度力的作用。最近, 实验上已间接证明这种梯度力的存在⁽¹⁾。它的成因可以这样来解释: 任何光子态 (衍射极限) 中的光子, 都可被视为理想气体, 因而在相干体积内由于光子密度的不同而形成压力差, 因此我们把它称做光子密度梯度力, 根据理论推导, 作用于电子上的这种力的大小为⁽²⁾:

$$F_{n_r} = - \frac{e^2}{m\omega^2} \vec{\nabla} E^2 \quad (6)$$

由 (6) 式不难看出: 当 $\vec{\nabla} E^2 > 0$ 时, EM 梯度场对电子施加阻力; 反之, 对电子施加加速力, 从起源上看, 这种 EM 梯度力是由罗伦次力派生而来的, 因此它对电子的作用具有以下特点: ①, 当 $\vec{\nabla} E^2 < 0$ 时, EM 梯度力可以使电子的平移动能全部转变为振动能; ②, 反之, 当 $\vec{\nabla} E^2 > 0$ 时, EM 梯度力可以使振动电子的振动能转变为平移动能; ③, 当 $\vec{\nabla} E^2 < 0$, 且足够大时, 可以阻止电子的运动, 并沿入射方向返回, 即产生电子被辐射场反射的效应。

利用以上的 EM 梯度力的性质, 可以把电子的平移动能转变为光能, 即进行光放大; 反之, 也可以使光能转变为电子的平移动能, 即进行激光加速, 正如后面将会看到的, 这是两种非常有意义的光子功能效应。

6. 多极梯度力

类似偶极梯度力, 当光子流作用在某些晶体上时, 由于非线性极化和 EM 梯度场的作用, 可以产生多极梯度力。

以上介绍了六种光子力及其功能作用, 实质上只有罗伦次力和光子压力是基本的。随着光与物质相互作用的研究不断深入, 有可能认识到更多的光子力及其功能作用。

三、光子的功能产生

在这节里, 我们主要研究如何把机械能转变为相干辐射能的问题。具有这种功能的系统, 被称为功能激光器或功能放大器。

最早当做功能机械来研究的激光器, 是 A. Hertzberg 提出的 CO_2 闭合循环气体动力激光器⁽¹⁾, 它的结构如图 I 所示, 它的组成部份有驻室、喷管、激光腔、扩压器、压缩机、冷却器等六个部份。这种激光器的基本工作原理是: 驻室中的高温高压 (称滞止温度和滞止压力, 约为 $T_0 = 1400K$, $P_0 = 17$ 个大气压) 混合气体, 经超音速栅格喷嘴快速膨胀, 由于 CO_2 :

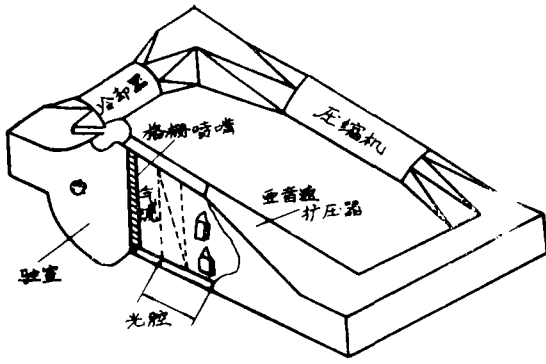


图1 闭环气体动力激光器

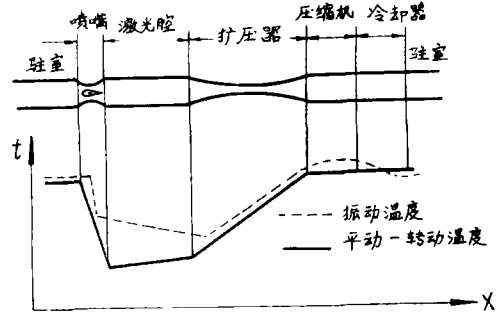


图2 闭合循环激光器温度分布

气体的上激光能级和下激光能级的驰豫时间不同，在激光腔造成粒子数反转，从而被取出激光能量，接着用有效的扩压器使气体的温度和压力恢复到激射前驻室中的状态（即 T_0 和 P_0 ），这样就完成了一次循环。具体的变化过程如图2所示。

文献〔1〕还对上述循环过程进行了热力学分析，结果是：

- (1) 单位质量气体从激光腔辐射出能量 δq_L
- (2) 压缩机对单位质量气体做功：

$$\delta h_w = \left\{ \frac{T_0}{\alpha T_v} \left[(1 - \alpha) \frac{T_v}{T} - 1 \right] + 1 \right\} \delta q_L \quad (7)$$

式中 T_v 和 T 是气体在激光腔里的振动温度和平动转动温度， α 是激光器的量子效率。

- (3) 必须从冷却器中单位气体质量排出热量：

$$\delta h_q = \frac{T_0}{\alpha T_v} \left[(1 - \alpha) \frac{T_v}{T} - 1 \right] \delta q_L \quad (8)$$

这样，就可以定义和求出这一循环系统的机械能 \rightarrow 辐射能的转换效率为：

$$\eta_{oDL} = \frac{\delta q_L}{\delta h_w} = \frac{1}{\frac{T_0}{\alpha T} \left[(1 - \alpha) \frac{T_v}{T} - 1 \right] + 1} \quad (9)$$

根据激光器理论，形成上下激光能级粒子数反转的激射条件要求： $(1 - \alpha) \frac{T_v}{T} > 1$ ，因此，从(9)式不难看出： $0 < \eta_{oDL} < 1$ 。从(8)式和(9)式可看出： $\delta h_w = \delta h_q + \delta q_L$ ，因此影响效率 η 的主要因素是废热排除的大小。当 $\delta h_q \rightarrow 0$ 时， $\eta \rightarrow 1$ ，即几乎把机械功全部转变为相干辐射能。从热力学的观点来看，这种接近完全的转换是可能的，因为能使气体在激射期间熵的改变尽可能小，这样就只需从冷却器中排出相当小量的废热。

从实际应用的观点来看，为了确保有效的激射作用，气体温度必须超过高温压缩机材料的耐温极限。而当应用于空间动力传输时，废热排除也是一个棘手的问题。由于种种原因，至今尚未研制出一台有用的闭环 CO_2 气动激光器，因此有待进一步进行深入研究。

作为第二类把机械能转换为辐射能的系统，我们来研究一种激光致冷过程。从本质上来说激光致冷是属于把原子或分子的平均动能转变为被散射的光子的能量，可以看成是光子的功能放大系统。激光致冷的机理如下：

原子或分子在光场中运动时，如果向着光源运动，则将感受到向上的多普勒频移。如果光

频 ν 低于原子共振频率 ν_0 ，由于多普勒频移，原子与光场共振，原子从光场中吸收了 $h\nu$ 的光子能量，而通过自发辐射放出了 $h\nu_0$ 的光子能量。由于 $h\nu_0 > h\nu$ ，即放出的能量大于吸收的能量，不足的一部份由原子动能补充。这样原子每散射一个光子就损失一部份动能，而被散射的光子则增加了相应的能量。最后原子在大量散射光子的过程中大量损失动能，从而使整个气体冷却。原子每散射一个光子引起的速度变化是： $\delta V = -\frac{h\nu}{MC}$ ， M 是原子的质量。以镁原子为例^[13]，它在 2851\AA 附近有吸收峰，每吸收一个光子平均降低速度 6 厘米/秒。当原子温度为 600K 时，原子的速度为 8×10^4 厘米/秒，原子散射 $V/\Delta V = 13000$ 个光子后，速度降为约 6 厘米/秒，等效于 10^{-5}K 。这一过程仅需 2.6×10^{-5} 秒就可达到，这时原子移动约一厘米，这就是说光照射的区域只需 1 厘米² 即可。如果激光频率是扫描的，即从低于多普勒半宽度开始变到 ν_0 ，则全部粒子被冷却，所需功率仅 0.1瓦/厘米^2 。

进一步，我们来研究利用驻波场冷却和捕陷原子或分子的机理^[14]。为此，分析一下原子在驻波场中受力的情况。我们可以将驻波场分解为两个相对传播的波列。原子在这个场中分别与这两个波相互作用，这时原子所受的自发辐射压力 F_s ，在 $\nu < \nu_0$ 时为负而使原子减速，在 $\nu > \nu_0$ 时为正而使原子加速。在驻波场里，原子所受的偶极梯度力可分为径向力和轴向力。当 $\nu < \nu_0$ 时，径向力为向心力，反之为离心力。当 $\nu < \nu_0$ 时，轴向力指向波峰，反之指向波谷。因此，当 $\nu < \nu_0$ 时，原子在驻波场中受到减速作用和向心作用。这样，原子就被减速和捕陷在驻波阱中，从而达到致冷和冻结的目的。原则上可以用此方案制成致冷机和获得“光生凝结态晶体。”

文献 15 报导了用激光冷却 Ba^+ 离子的实验结果。最近，文献 16 报导了用激光的自发反 Stokes 散射冷却 Na 原子的实验结果，第一次实现了对中性原子的激光致冷和捕陷，可以大大改善激光光谱的分辨率和探测灵敏度。

作为第三类把机械能转变为相干辐射能的功能激光器，是所谓的自由电子激光器。从光子机械学的观点来看，自由电子激光器是把电子的平移动能转变为相干辐射能。这种器件的工作原理是利用相对论电子束与交流磁场相互作用，与其行波发生共振，如图 3 所示。经过适当的相位调整，电子能以与行波放大器多少相似的方式把电能高效率地转移到光波中去。早在 1951 年 Madey^[15] 就提出用自由电子产生相干光的概念，但直到 1971 年才开始研究自由电子激光器，并于 1976 年首次成功地获得几十千瓦的峰值功率。从理论上讲，自由电子激光器可以在任意选择的波长上、并以 30%—50% 的效率进行功率很高的运转。但实际上，目前一直没有突破短波限和高功率限。自由电子激光器的其它优点在于它与高能加速器和微波器件性质相同，另外它的光学介质是最理想的，不存在大的各向异性气流的折射问题。此外，自由电子激光器是“可逆的”，可能从激光束吸收相干能量，在这一过程中加速电子。由于能量能以高效率过渡给电子，并由于在相似器件中产生激光辐射并把它重新转换为电能的两种可能性都存在，这对大规模能量传输是很理想的。

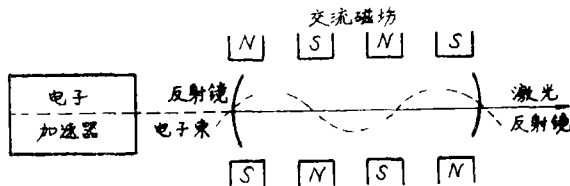


图 3 自由电子激光器示意图

四、光子引擎

现在, 我们来研究把相干辐射能转变为机械能的系统。激光悬浮、激光偏转、激光加速、激光产生超声波、激光产生引力波等, 都应属于这一范围。但限于篇幅, 本文只研究与LPTS系统有关的光子引擎装置。

从理论上说, 可以把图1所示的闭合循环气体动力激光器改造成吸收相干辐射并把其有效地转换成轴功能的系统。改造方法如下⁽¹⁾: 气流从驻室通过喷咀再膨胀, 但是用普通的超音速喷管而不用栅格喷管, 目的是使激光腔变成吸收腔。在吸收腔内气体吸收外来的强相干辐射后被“漂白”(即上下能级粒子数相等), 不再吸收辐射。在漂白以后, 气体进入格栅扩压器, 经过突然的解冻过程, 气体再转入新的平衡。在扩压器之后, 混合气体将有稍高于上游的压力, 当气体再作循环时, 热再一次从冷却器中取出, 但由于总压增加了, 压缩机这时就成了涡轮机, 于是就能从该系统中取得轴功。因此把这个系统称作光子引擎。热力学的分析也类似, 但有三点不同:

① δq_L 这时是负的;

② $\frac{T_v}{T} < \frac{1}{1-\alpha}$, 即有吸收条件;

③ 光子引擎的效率应定义为:

$$\eta_{PE} = \frac{\delta h_w}{\delta q_L} = 1 + \frac{T_0}{\alpha T_v} \left[(1-\alpha) \frac{T_v}{T} + 1 \right] \quad (10)$$

由公式(10)可以看出: ①, 当 $\frac{T_v}{T}$ 和 $\frac{1}{1-\alpha}$ 有很大差别时效率很低, 而接近时 $\eta_{PE} \rightarrow 1$; ②, 当 $T_0 = T > T_v = T$ 时, η_{PE} 为负, 即 $\eta_{PE} < 1$, 这就意味着在吸收激光辐射的过程中, 气体嫡值上升如此之高, 以致必须以对气体做功的形式补加能量, 来使 $\delta h_w < 0$, 从而将嫡传递给冷却器。

以上是A. Hertzberg等所建议的光子引擎系统, 虽有接近于1的转换效率, 但已发现有实际工程上的困难。代替上述系统, 最近Garbuny⁽³⁾提出了一种准等嫡发动机, 看来很有希望付诸实现。其结构如图4所示。基本循环过程包括一只激光辐射驱动的分热泵, 它从较冷的贮热器I输送能量到较热的贮热器II。一台卡诺热机在两者之间运转, 从II吸收热量, 做功, 排能给I。这样, 如果后选的分热泵(例如CO)被证明能够完成热泵功能, 那么此方案有可能形成一个远距离有动力作用的高效发动机, 而无需排除废热。

另一个激光驱动的发动机, 是在工作液中利用共振吸收完成的。Taussig等的工作⁽³⁾, 确证这种发动机从激光转换成机械功, 有50%的转换效率。他们对高低功率的系统分别建议采用前置一能量交换器的Boryton循环和奥托循环, 这种设计特别适合于许多转换过程。例如在激光驱动发动机或在太阳锅炉中, 被加热的工作液的温度超过了转换结构的材料限制。在他们的设计中, 要包括一套冲击激励管, 它们连续地把输入的高温气体转换成较低温度。在这个过程中, 有较高压力的输出气体预计有较低的能量损失。

作为光子引擎应用于激光飞机中的激光动力涡轮风扇发动机, 如图5所示。

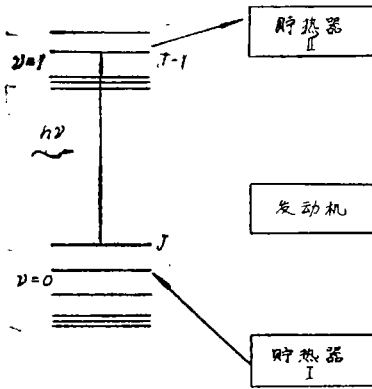


图4 激光热机

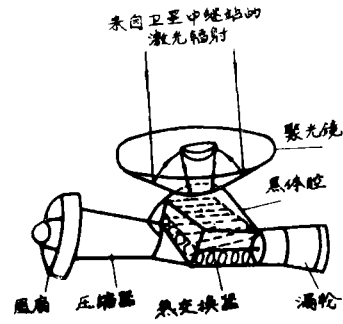


图5 激光动力涡轮风扇发动机

这种发动机由两个主要部份构成：将来自卫星中继站的激光辐射变成有用的热能的热交换器和普通的涡轮机。激光涡轮风扇发动机组装在普通飞机的机壳或推进舱内。舱的顶部，直径为15米的接收器将激光束聚焦到5米直径开口的黑体腔内的热交换器上。在腔内，激光辐射通过反射镜系统和光导管照射热交换器内部。反射和再辐射耗损总共不大于3兆瓦。从压缩机来的空气掠过热的薄壁圆管的外壁，一直通到涡轮机。为了使热交换器的压降保持在较小的值上，进气流的马赫数保持在0.05。覆盖接收器的窗口材料选用兰宝石之类，它具有红外透过性能好、机械强度高、热学稳定性高，以及对热冲击反应不大等优点。采用窗口的目的主要是防止黑体腔和聚光器之间的对流。另外，由于光能被会聚在较小范围内，因而使人们可把热交换器设计得比较紧凑，这样，由于热交换器的质量比普通飞机的体质量小，因而激光飞机的造价同煤油飞机差不多。

最后，必须指出，把太阳能直接转换为机械能的系统，也是一种光子引擎，而且具有直接而重要的应用价值。A. Hertzberg和Lau⁽³⁾讨论了一种可能的方案：利用兰金双循环和波能交换器，可以获得太阳能——机械能的转换效率约为60—73%。若达到这一指标，无疑地在太阳能转换技术上是一项重大的突破，图6绘出了这种太阳能涡轮机的一个示意结构。

当然，如果能把太阳能直接转换为相干辐射能是最理想的方案。W. H. Christiansen和R. Taussing等正在研究这一问题⁽⁴⁾。他们提出用太阳光加热黑体腔和用黑体腔的热辐射泵激励介质的方案。有待深入探讨。

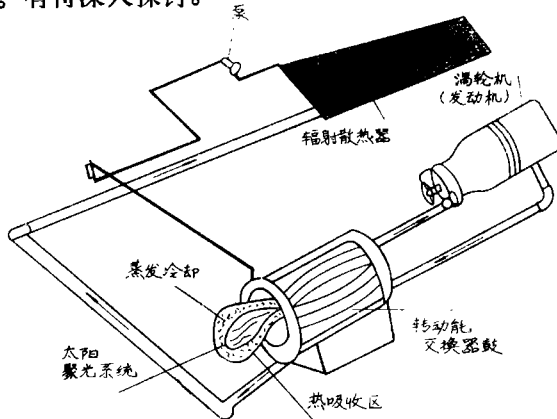


图6 太阳能涡轮机

五、光子的功能存储

一部理想的光子存储器，必须是能把射入的相干辐射全部吸收，存储在该系统中任意长的时间，并在需要的时候又以相干辐射的形式部份地或全部地取出。

第一个被研究的光子存储器，也是由 N_2-CO_2 混合气体构成的系统^[1]，如图7所示。从 CO_2 激光器发出的多模激光入射在加热过的，并以接近音速流动的 CO_2-N_2 和触发剂（通常是He）的混合气体上。混合气体的温度选择得使下激光能级上的 CO_2 分子数最多。由于共振吸收和饱和效应，气体将达到“漂白”状态，这时上激光能级上的粒子数将等于下能级的粒子数。这样，能量就被储存在 CO_2 和 N_2 混合气体的振动能级中。为了提取储存的振动能量，只要让气流超音速膨胀到较高的马赫数，使下激光能级去激而产生反转。这样，储存的能量就能提取出来。由于膨胀的开始状态不是热平衡态，而是满足“漂白”条件的 $n_u = n_l$ 状态，结果大约只要气动激光器的M数的一半，就可使粒子数反转，这样就使激光器中的气流均匀得多，因而激射介质在高功率时能得到较大的模纯度。总起来说，此种光子存储器中的动力学过程分为两个区域：一为吸收区，在此区中能量被加入到 CO_2 的(001)振动能级和 N_2 的 $v = 1$ 的振动能级；二为膨胀区，在此区中产生粒子数反转，和激光辐射。这种光子存储器的主要损失来自：① $v = 3$ 到 $v = 2$ 振动模的碰撞漏损（综合反应在上激光能级的寿命 τ_2 中）；②在“漂白”期间由于 τ_2 引起的能量损失。通常这个损失为50%，但更合适地选择混合物，可以显著地减少这些损失。不难看出：这种光子储存器类似于上一节中分析的光子引擎系统，因而高效率工作的条件也很类似，即在适当选择参数的条件下，储存效率也可接近1。但是，由于储存的时间不能大于上激光能级的寿命 τ_2 ，这就限制了它的应用。

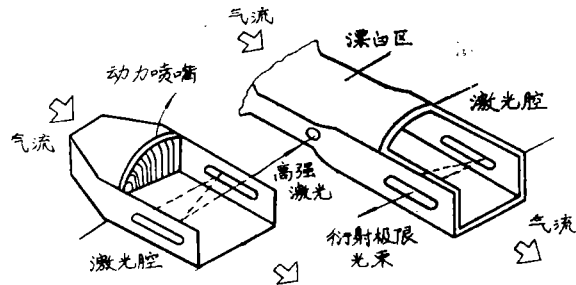


图7 光子储存器示意图

作为一个设想，我们来试一试利用EM梯度力的功能效应能否构成另一种光子储存器（GPC），这种储存器由三个部份组成：①EM梯度力激光加速器；②Salter空间电子储存环^[3]；③EM梯度力激光放大器。这一光子储存器的工作原理是：通过EM梯度力加速器，把相干辐射能转变为Salter储存环中相对论电子流的动能，并储存起来，在需要的时候射入一激光小讯号，经EM梯度力激光放大器，使这一小讯号被Salter储存环中的电子束放大，即把电子的动能转变为相干辐射能。这种光子储存器各部份的工作原理和性能如下：

1. Salter电子储存环

最近，Salter提出一空间电子储存环的设想。理论和实验证明：如图8所示，电子在

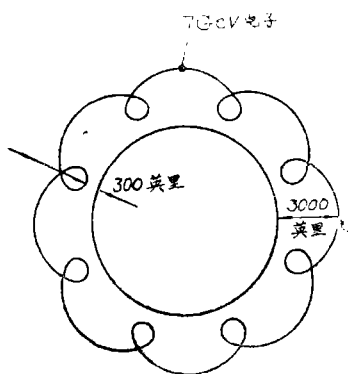


图 8 赤道平面电子环

地球赤道平面内的稳定轨道（8极地球环径）是存在的。而所要求的电子束处理和电子束发生的硬件质量，对于在空间应用是足够低的。这种电子束能够存储的最高功率约为 $3.4E^2$ 千兆瓦， E 为电子能量，单位为兆电子伏。

对于1GeV的电子束有高达 3.4×10^{16} 瓦的数值。

2. EM梯度力激光放大器

这种新的激光放大作用，是利用EM梯度场对自由电子的减速作用。当自由电子从衍射斑的一端射入，随着光强度的增加，电子将受到一阻力，如光强足够强的时候，将使其速度减至零，使其平移动能全部转变为振动能，如果这时正好达到强度均匀的中心区，在激光场的作用之下，电子将感应辐射把振动能转变成光能。H.Hora对这一放大过程进行了理论分析⁽¹⁸⁾：认为除了可能得到极高强度以外，还可产生高效的增益。例如，对于一个 10^{11} 瓦的 CO_2 激光束，如果光脉冲和电脉冲的持续时间都是0.3毫微秒，电子束的能散度为1电子伏，电流密度为2.5安/厘米²，则经过6700次作用后，就可把激光脉冲功率放大 10^8 倍，即放大到 10^{16} 瓦。因此，用这一方案作为能量的提取方式，是十分理想和有效的。

3. EM梯度力激光加速器

EM梯度力加速电子的过程，是上述EM梯度力放大激光的逆过程，是利用EM梯度力对自由电子的加速作用，让低能电子先在均匀强激光场中获得与光强成正比的振动能量，然后经过逐渐减弱的梯度场，使振动能全部转变为电子的平移动能，即电子得到加速。例如当均匀强激光的功率密度为 10^{19} 瓦/厘米² 时，就可使低能电子获得 ~ 1 GeV 的能量，当使用闭环循环激光器充分利用激光能量时，就可以高效地把光能转变为电子的动能。最近，T.Tajima等提出⁽¹⁹⁾，把光脉冲射入稀薄的等离子体中，由于EM梯度力的作用，将在等离子体中激起等离子体振荡，并在光脉冲的尾部激励起静电尾流，从而形成一纵向电场，使电子加速，利用 10^{18} 瓦/厘米² 的功率密度的1.06微米的激光，就可在1cm距离上使电子加速到1GeV的能量水平。因此，有可能用于电子存储环方式的光子存储器中。但必须指出：太阳能的存入不一定通过激光加速方式。

最近，Salter曾经提议，用一只低轨道空间飞船进行周期性地集结，作为存储太阳发生能的措施。当卫星航行到需要接收的地点的上空时，这种能量被转换和传输下来。Salter还讨论了适宜于这种传输的把电子束能变换为相干辐射能的方法。

总的来说，利用电子束作存储介质，对光能进行存储和提取，是一种可能的光子存储器。但由于同步辐射损失，使得它的存储时间也是有限的。

六、结 束 语

根据以上各节的分析，可以得到以下结论：

1. 光子机械不仅研究普通机械能和光能之间的互相转化，而且还应包括与光子力及其功能作用有关的各种效应，如激光致冷，激光加速等；

2. 光子机械主要由三部分组成:

功能激光器, 光子引擎, 光子储存器, 其中光子引擎研究得比较深入具体, 有可能较快获得应用;

3. 光子存储器虽然还很不成熟, 但利用电子束作存储介质后, 有可能很快改变状况, 获得广阔的发展;

4. 空间激光动力传输是光子机械的最豪迈的设想, 反过来LPTS系统的需要将促进光子机械的进一步发展;

5. 因此, 本文认为, 光子机械是正在兴起的崭新的应用学科领域, 它所研究的各种特殊功能, 正在发展并且得到应用。应引起足够的注意。

参 考 文 献

- [1] A.Hertzberg; AIAA. Jou. 1971. No. 71—106 Jan.
- [2] W.H. Christiansen, A.Hertzberg; Proc. IEEE 1973 61 1060.
- [3] K.W. Billman; Astronautics & Aeronautics 1979, (Mar) 17. No.3, 18—26.
- [4] C.N. Bain; Astronautics & Aeronautics 1979, (Mar).17. No.3, 28—40.
- [5] A.Ashkin; Phys. Rev. Lett., 1970 24, 150.
- [6] A.Ashkin; Phys. Rev. Lett, 1970 25, 1321.
- [7] T.W. Hansch, A.L. Schawlow; Opt. Comm. 1975 13, 68.
- [8] T.Gerry, D. G. Rather; Astronautics & Aeronautics, 1979, (Mar).17, No.3, 60—67.
- [9] W.B. Colson, S.K. Ride; Appl. Phys. 1979, 20, 1, 61—65.
- [10] H. SeKi; J. Appl. Phys., 1973, 44, 2401.
- [11] J.P. Gordon; Phys. Rev., 1973, A, 8, 14.
- [12] T.W.B. Kibble; Phys. Rev., 1966, 150, 1060,
H.Hora, Phys. Fluid. 1969, 12, 182; 1974, 17, 949.
- [13] V.S. Letokhov, et al.; Opt. Comm. 1976, 19, 72.
- [14] A.Ashkin, Phys. Rev. Lett. 1978, 40, 729.
- [15] W.Nevhauser et al., Phys. Rev. Lett. 1978, 41, 233.
- [16] N.Pjeu, W.T.Whitney; Phys. Rev. Lett., 1980. 46, 236.
- [17] A.Hertzberg, K.C. Sunetal; Astronautics & Aeronautics, 1979, 17, 18—26.
- [18] H.Hora; Laser, 1979, 11, 30—31.
- [19] T.Tajima, J. M. Dawson; Phys. Rev. Lett., 1979, 43, 267—270.