

激光等离子体推进技术的研究进展*

郑志远 鲁欣 张杰[†]

(中国科学院物理研究所 中国科学院光物理重点实验室 北京 100080)

摘要 传统的采用化学燃料来驱动火箭升空的技术由于昂贵的发射费用、低的载荷比、复杂的发射操作运转模式、重复使用困难等缺点而一直困扰着人们对太空的进一步探索。但随着激光技术与航天技术的飞速发展,激光作为一种先进推进技术逐步呈现出其他推进技术不可比拟的优势和发展前景。文章对激光等离子体推进技术的工作原理和研究现状做了介绍,并对激光等离子体在驱动微型飞行器方面目前存在的技术问题和研究热点进行了简述。

关键词 激光,推进,等离子体

Overview and future prospects of laser plasma propulsion technology

ZHENG Zhi-Yuan LU Xin ZHANG Jie[†]

(Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Due to its high cost, low efficiency, complex operation and unsatisfactory recycling, traditional rocket propulsion by chemical fuels has hindered the exploration of outer space to further limits. With the rapid development of laser and space technology, the new technology of laser propulsion exhibits unique advantages and prospects. The mechanism and current development of laser plasma propulsion are reviewed, with mention of the technical problems and focus issues of laser plasma in micro-flight propulsion.

Key words laser, propulsion, plasma

1 引言

传统的飞行器及火箭的驱动都是通过化学燃料的燃烧来实现的,但是燃料本身一些固有的条件如化学能、燃烧温度和效率等限制了飞行器在更为深远的星际航行中的应用。此外,从地面发射飞行器至地球低轨道,费用大概是15 000美元/千克,而发射至同步轨道则更贵。高昂的发射费用,同样限制了更大规模的商业航天活动。要使单位质量的推进剂提供更多的能量,产生更大的推力,只有借助外部的能量注入^[1]。在2002年的Appl. Phys. Lett.杂志上有一篇论文报道了用激光产生的等离子体驱动飞机模型的实验^[2]。虽然采用的飞机模型的重量只有零点几克,没有真正使用的价值,但是它却对传统的采用化学燃料驱动飞行器飞行的观念提出了挑战。其实,早在1972年,美国学者Kantrowitz等就首先提出了利用激光烧蚀产生的等离子体来代替化学燃料推进空间飞行器的概念^[3]。随后,其他发达国家如德国、

前苏联、日本等也开始涉足这个领域,他们的主要目标就是大幅度减少在发射卫星方面的费用。近期的研究目标是驱动1kg的载荷花费1000美元,并且对于激光驱动的发射费用,研究者们希望限定在100美元/千克的范围内,以便在将来的空间传输中发挥重要的作用。利用激光等离子体来推进的微型飞行器,因为没有传统意义上的发动机,只配备观察和通信装置,质量较小,可以用于观察气候和火山。激光等离子体推进技术还可以将卫星直接发射进入近地轨道,将近地轨道卫星转移到地球同步轨道,维持卫星轨道参数和清除太空垃圾等,在航天运载火箭发射、卫星与飞行器空间机动等方面有着广泛的应用前景。

* 国家自然科学基金(批准号:10004015,10176034)资助项目

2003-03-13收到

[†] 通讯联系人, E-mail: jzhang@aphy.iphy.ac.cn

2 工作原理

激光推进的基本原理同火箭发动机类似,都是利用反冲运动的原理来推进飞行器.不同之处在于它使用激光束的能量来加热推进剂,而不是依靠推进剂自身的燃烧,这使得它能超越燃烧温度的限制,形成核心温度为(10000—20000)K甚至更高的高温等离子体.这种高温高压的等离子体具有极强的做功能力,实验及理论分析表明,激光推进的比冲可以高于 $1000\text{s}^{[4]}$.这种高温高压的等离子体可利用地面上的激光装置经过长距离传输到火箭发动机中的推进剂来完成,飞行器本身不需要携带过多的能源设备,而且激光推进这种技术无需传统化学推进中的大分子质量氧化剂,燃烧温度也能大大提高,这样可以使能量的利用率大幅度提高.典型激光推进的工作原理如图1所示.它的前端是碗状的轴对称抛物面反射镜,尾部是膨胀喷口.镜面反射由地面射来的激光束,并形成环状聚焦,尾部装置接收并聚焦脉冲激光能量.激光击穿工作流体,形成热等离子体膨胀,推动飞行器.它的推进剂既可以是气体,也可以是液体和固体.

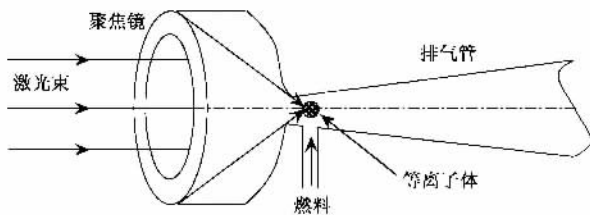


图1 激光推进的工作原理示意图

就工作介质而言,激光推进的工作模式分为“大气呼吸模式”和“火箭模式”两种.大气呼吸模式是直接利用大气层的空气作为推进剂,激光脉冲被火箭的光学系统聚焦后击穿燃烧室里的空气产生爆轰波,爆轰波的波峰和燃烧室的腔壁相碰撞时就把动量传递给了火箭.大气呼吸模式的好处是火箭自身不需要携带推进剂,但局限性也十分明显,它只能在从地面到二三十公里高的大气层区域工作,并且随着高度的增加,其工作效率会逐渐下降.超过了一定高度,就必须转换到火箭模式.火箭模式是利用特定的介质作为推进剂,然后利用高强度的激光辐照推进剂,产生瞬态的高温高密度等离子体,等离子体迅速膨胀,并以很高的速度向后喷出,从而使火箭受到向前的推动力.

从激光的工作方式来说,可以将激光推进分为

连续波与脉冲波两种方式^[5].典型的连续波推进方式的推力室设计如图2所示,它采用了周流式结构,即以燃烧室头部的圆周为推进剂喷射入口.在这种约束条件下,等离子体被维持在吸收室中心处,低温的推进剂围绕等离子体流动,起到作为壁面隔热的作用.等离子体下游是冷热流的混合区,最后在喉部入口处获得统一的温度.这种周流式的设计是为了最大可能地减小吸收室壁的热损失.因连续激光能量较低,不能直接产生超音速爆轰波,所以使用了拉瓦尔喷管.连续激光推进有两个方面的局限^[6]:一是由于等离子体在高温下会产生很大的辐射能量损失,并传给喷管壁大量的热能,因此发动机壁要采用特殊耐热材料和冷却措施,以防止其在高温下被熔化;另一方面是由于等离子体的屏蔽效应将会把激光束与推进剂隔离开.而脉冲激光推进方式看来在解决这些问题方面要有效些.脉冲激光推进是用快速重复的高能脉冲激光束来加热推进剂,在这种方式下,工作介质不是被稳定地加热,而是产生一系列巨大的脉冲爆轰波,典型的结构如图3所示.当推进剂流动到激光聚焦区域时,会迅速升温,发生电离,成为高温的等离子体并迅速膨胀,形成激光支持的爆炸波,然后爆炸波从超音速喷管中喷出产生推力.

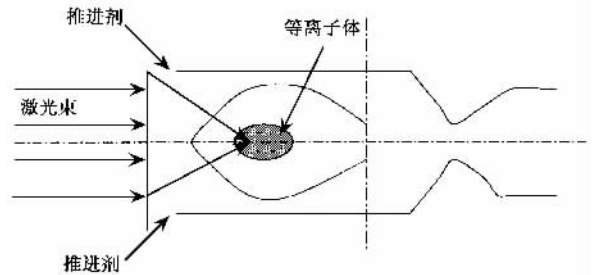


图2 连续波激光推进示意图

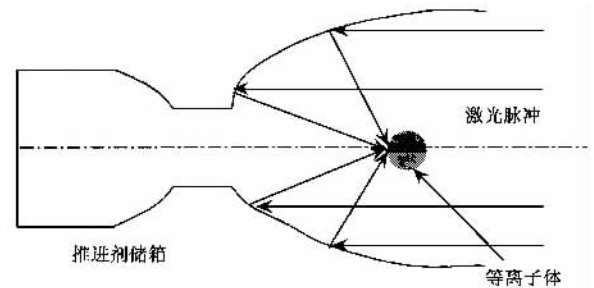


图3 脉冲波激光推进示意图

3 激光推进技术的特点

对于国际上相对成熟的化学火箭推进技术和电火箭推进技术都有自己的不足之处.化学火箭推进

技术的推进剂和能源是合而为一的,除了化学燃料自身具有的危險性、污染环境的缺点之外,推进剂的重量占运载器总重量的90%以上,有效载荷比仅占1%左右,而受推进剂化学能的限制,其推力很难提高。同时,其发射操作运转模式复杂,发射成本高,重复使用困难。相对来说,电火箭推进技术能够获得较高的运载效率,但是,由于其推力小而且必须携带笨重的能源设备,难以应用于运载发射的需要。对于另一种新能源的核推进技术来说,推力较大,比冲也较高,但飞行器需要携带笨重的核反应装置,且设计与防护复杂,应用前景并不乐观。

激光等离子体推进技术有许多优点^[7]。首先是发射费用明显降低。激光推进技术一旦获得广泛应用,将使发射费用降低两个量级左右,将一个1kg的微型卫星推进到近地轨道仅需几百美元,远低于用运载火箭发射所需的几万美元的费用,将彻底改变传统运载火箭发射航天器的模式。其次,它的比冲远大于一般的化学燃料火箭。化学燃料推进由于受燃料自身化学能、燃烧温度和效率等固有条件的限制,比冲受限,一般小于500s。而激光推进不受以上条件的限制,可获得比化学火箭高几倍、几十倍的比冲,从而实现航天发射低成本、短周期、可重复的目标。再者是安全性好。在激光推进技术中,飞行器与能源、能源与工作介质是完全分离的,火箭前进的动力不是依靠燃烧化学燃料获得,而是来自外部激光束。这样,推进剂本身的燃烧值就变得不重要,因此完全可以采用不可燃的材料作为推进剂,这便使火箭的制造加工、发射以及使用过程更加安全。第四是污染小而且可以控制。目前很多种类的化学燃料及其燃烧后的产物的排放物是有污染甚至是有毒性的,而激光推进火箭完全可以用清洁无污染的材料作推进剂而不产生任何环境污染。到那时候,火箭发射既没有长长的火焰,也没有震天动地的隆隆巨响,在无声无息中将火箭送入轨道。

4 研究现状

4.1 国际研究进展

正是由于激光推进技术有着巨大的潜在优势和广阔的应用前景,各个发达国家先后对该项技术进行了研究。美国是最早提出激光推动技术并开展相关研究的国家。自20世纪60年代中期以来,美国就开始进行激光能量与固体靶所获得动量之间的转换研究。70年代,美国开始系统地研究激光推进技术。1997年,美国空军实验研究室的推进部与美国宇航

局的马歇尔空间飞行中心利用10kW、10Hz的CO₂激光器,将直径为15.3cm、质量约42g的铝制模型在3s内上升到了22m的高度。这项研究起源于80年代末由战略防御倡议办公室激光推进计划所资助的“轻型飞行器技术验证器”概念项目,目标是用100MW的CO₂激光器将净质量120kg,直径1.4m的飞行器送入轨道。1998年,美国科学家使飞行器垂直自由升高4.72m,水平滑行121.3m。1999年,他们又将直径为11cm的光船发射到39m的垂直高度。2000年,美国光船技术公司则将直径为12.2cm、重50g的光船发射到71m的高度,光船飞行12.7s,这是迄今为止飞行时间最长、飞行高度最高及飞船重量最重的记录,其意义不亚于当年莱特兄弟第一次驾驶飞机飞上蓝天。

俄罗斯对激光推进技术的研究几乎是与美国同步进行的。前苏联从20世纪60年代开始大量研究强激光与各种靶材相互作用产生的等离子体及其动力学过程。于70年代中后期相继报道激光空气发动机和大气中的激光推进等研究结果。到80年代进一步研究了激光喷管中等离子体的磁场问题。俄罗斯计划在最近3年内,实现在大气中进行轻飞行器的穿线式飞行实验,将光船推进到40—50m的垂直高度。

德国空间中心从20世纪90年代开始进行激光推进技术的实验研究,他们提出了利用激光推进技术将10kg的载荷发射到近地轨道的设想。此外,日本已于90年代研制了激光推进实验装置。1991年,日本航空宇宙技术研究所流体力学部与大阪府立大学工学部联合进行的激光推进小船模型的实验获得成功。2002年,东京技术研究所又成功地推进了纸飞机的飞行。

4.2 热点问题

虽然激光等离子体推动技术进行了大量的实验和理论研究,但由于它是一项新的技术,在概念、机理和方法等方面还存在着大量的基础性探索工作要做,还存在大量的关键技术问题需要解决^[5]。

4.2.1 激光器功率问题

要真正实现有实用价值的飞行器发射,激光器的功率至少要达到兆瓦级,这在现阶段是相当高的功率。且脉冲激光器比连续激光器的制造更为复杂,技术要求更高,因此,激光推进要求有新一代大功率激光器的出现。

4.2.2 强激光光束的大气传输与控制

激光发射必然涉及光束的长距离传输问题^[8]。而在大气传输过程中,大气的不均匀性及其运动的

随机性,使光束产生一系列的线性与非线性效应,出现能量衰减、光束失真、散射等问题,影响激光束的品质,进而影响能量的吸收与转化效率。

4.2.3 光束的目标跟踪与定位系统的设计

要使地面发射的光束能精确地照射在远距离的飞行器推进系统上,并实时地跟踪超音速运动的飞行器,就要保证适当的入射角度,目标跟踪与定位系统的指向精度要求相当高,且执行控制机构也要很灵敏。地面实验一般用光学望远镜很容易实现光束的近距离定位,但对远距离的高速目标,跟踪与定位系统还需继续研究。

4.2.4 激光与推进剂的相互作用及能量转换关系

能量的转化与吸收效率是激光推进的关键性指标,关系到推进系统总体性能的优劣。推进剂接收入射激光,在不同条件下通过不同的吸收机制吸收激光能量,温度升高,同时发生复杂的相变。这一过程的时间很短,且发生在高速运动的流场中,所以推进剂能量的吸收伴随着相当复杂的动态过程。同时外界条件如推进剂特性、激光波长、聚焦尺寸等参数的变化也会对它产生影响。早在1974年,Pirri等^[9]就研究了不同的推进剂与激光能量之间的关系。他们采用的推进剂为石墨、合成树脂、氟化锂。结果表明,在对石墨靶的驱动中,某些特殊脉冲的耦合系数最大达到 $(2-3) \times 10^{-5} \text{ N/W}$,能量的转化率为2%—7%;而合成树脂的能量转化率却达到了10%—20%。Yabe等^[3]研究了铝膜表面的水膜和丙稀酸对激光能量的吸收,认为水膜更有利于激光能量的吸收。Pirri指出,要实现稳定状态的驱动,需要靶材料的气态的吸收率很高,并且随着温度的增加,它的吸收率降低。一种理想的材料是低分子量,并且含有容易离化的成分(如氢、氦、铯)。用这些成分来提高靶材料在气态时对激光能量的吸收,从而提高对飞行器的推动速度。实验表明^[10],激光脉冲产生的冲量随靶材料元素的核电荷数增加而增加,但比冲却是随靶材料原子量的增加而减少。图4为激光脉冲产生的冲量随元素原子量的变化。Fabbro等人^[11]在研究不同的脉冲宽度对产生压力的影响时发现短脉冲对靶的表面的粗糙度很敏感,且短的脉冲有利于提高质量的利用率,这样可以使得驱动时间大于脉冲宽度。

4.2.5 激光加热流的稳定性

为保证推进剂动量转化的高效率与飞行的安全可靠,推力室内的流动必须稳定。不稳定的流场将导致能量吸收率的急剧降低,在推力室中产生复杂的

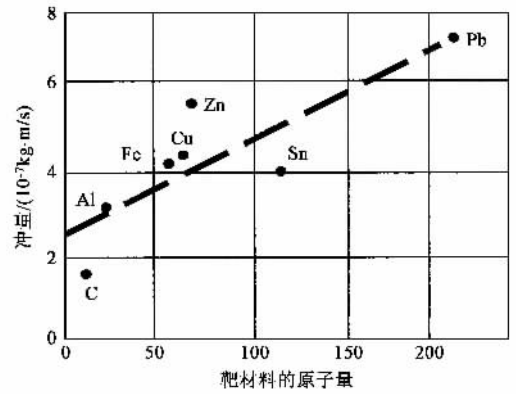


图4 激光脉冲产生的冲量随靶元素原子量的变化

难以控制的流动,使得发射失败,因为推进系统的燃烧与流动发生在超音速运动状态下,流场动态性强,运动过程结合能量的吸收与损失,影响因素较多。这方面的研究从一开始就被提出,实验研究表明,可以获得一定的稳定加热流,但对于高能量密度和高频的脉冲光束,还有待研究。

4.2.6 等离子体在超音速流场中的运动与能量传递特性

推进剂吸收能量后,在瞬间相变成高温高压的等离子体,由于推力室的形状及内流场的限制,它将向下游运动,并与未被加热的推进剂混合,同时继续吸收入射光。在这个过程中,对等离子体的运动分析关系到推进剂将内能转化为动能的效率,直接影响比冲与推力的大小。

4.2.7 燃烧波与爆轰波推进的机理

激光推进也就是利用激光支持的膨胀波即燃烧波与爆轰波来推进。在能量稍低时,瞬时高温的等离子体产生亚音速的燃烧波,推进剂被连续加热,稳定状态下整个流场是定常的。能量高时,产生超音速的爆轰波。在脉冲方式下,流动并不平衡,是一种冻结流。这种推进机理还不是很清楚,对它的产生与传播过程的实验研究及理论分析有不同的方法,对这种波的特性的研究还未统一。在很早的时候,人们已经注意到激光烧蚀靶时会产生一个压力波。1970年,Anderholm^[12]测量了激光脉冲产生的压力波的大小,振幅达到了34kbar($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$)。压力的表达式为

$$P_{\max} = (ZE_0/3t_D)^{1/2},$$

其中 E_0 是能量密度, t_D 是脉冲半宽度, Z 为介质声速和介质密度的乘积。Beverly^[13]等用 CO_2 激光器研究了金属靶和非金属靶对激光束产生的压力波的影响。而Fabbro等^[10]通过改变靶的结构来提高脉冲

产生的压力,如图5所示.他们在靶的前面放置一个透明的绝缘材料,利用该绝缘材料来延长等离子体的膨胀时间,可以使压力的作用时间延长2倍,这样脉冲产生的压力比直接烧蚀靶时产生的压力提高了4—10倍.

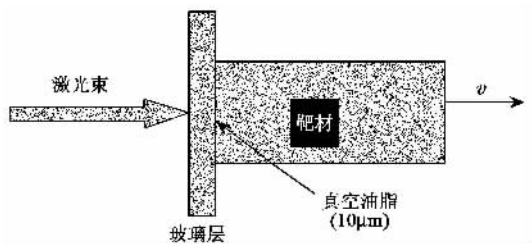


图5 靶前加有绝热板来提高脉冲压力

4.2.8 能量损失问题

能量损失发生在推进的整个过程中:光束在传播、反射、会聚过程中以及推进剂在发生作用时,还有高温等离子体的辐射等,能量损失相当大.虽然有实验显示,在对流条件下,等离子体最高可吸收90%的入射光能,最高可有38%的入射光能转化为推进剂的动能,但受外界条件变化的影响大.同时,高温带来的推力室的冷却问题,也是不容忽视的.

4.2.9 推进系统设计

如何更有效地将光束能量转化为推进剂的热能,涉及到推进系统的构型问题,怎样将吸收室与喷管集成化设计,达到最佳的推进性能,是值得考虑的.这些都是在激光推进中需要深入研究的课题.这些问题的解决,对于将激光推进技术运用到更广阔的实际应用领域是必不可少的. Ageev 等^[14]在考虑了喷嘴处的辐射损失和空间效应的条件下,从理论上和实验上同时证明,有喷嘴时的反冲动量是无喷嘴时的4倍. Myrabo 等^[15]人利用大气呼吸方式,将重为50—60g的飞行器水平方向滑行了121.3m,垂直方向在光束的控制下上升了4.27m,激光的能量耦合系数达 $(10—14.3) \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}/\text{J}$,加速度为2.3g/s.图6为飞行器的实物照片,图7为飞行器在金属丝牵引下水平滑行的轨迹,图中看到的光晕就是被爆轰波散射出来的空气等离子体的发光.所用的驱动燃料通常是低分子量的气体,但也可以采用固定在尾部的固体,这样可以获得更大的驱动力和更高的能量耦合率. Simons 等^[16]用流体模型数值模拟了脉冲与喷嘴结构、激光能量及脉冲频率的关系.指出要使一个2磅(1磅=0.453593kg)重的实验室火箭得到10g/s的加速度,所需的激光能量为15J,频率为25kHz,要使一个1000kg重的火箭实现同样

的加速度,需要的激光能量为 10^5 J ,重复频率为350Hz.

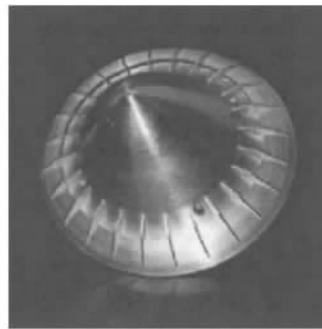


图6 火箭模型的实物照片



图7 飞行器水平滑行的轨迹

此外,激光推进是全新的推进方式,所以它的发射技术也应该有全新的思路.实现单级入轨,就放弃了传统的先停泊轨道,再转移轨道,最后入轨的发射控制方法.而将飞行器直接送入轨道,就要有合理的发射控制与飞行控制策略.相关的地面设备,包括激光设备、发射台、跟踪与瞄准系统、飞行控制系统等,都需要结合激光发射的特点来设计.

5 总结

激光推进技术是一种高性能的新生物技术,这项技术的诞生,促使传统的运载火箭技术发生革命性变革.要真正实现激光驱动火箭,目前还存在许多技术上的困难,但这是一项充满生机和挑战的新技术.我们相信,随着各个方面技术的发展,特别是激光技术的飞速发展,有望在不久的将来真正实现激光驱动火箭升空.那时,人类将进入一个空前繁荣的航天时代.

参 考 文 献

- [1] John E F. Rev. Sci. Instrum., 2002, 73: 2020
- [2] Yabe T et al. Appl. Phys. Lett., 2002, 80: 4318
- [3] Kantrowitz A. Astronautica and Aeronautica, 1972, 10(5): 74
- [4] Glumb R J, Krier H. Journal of Spacecraft and Rocket, 1984, 21: 70
- [5] 辜建辉等. 推进技术, 1995, 2: 80 [Gu J H et al. Journal of Propulsion Technology, 1995, 2: 80 (in Chinese)]

- [6] 吴刚等. 上海航天, 2002, 2 :47[Wu G *et al.* Aerospace Shanghai, 2002, 2 :47(in Chinese)]
- [7] 鲁欣等. 物理, 2002, 31 :796[Lu X *et al.* Wuli(Physics), 2002, 31 :796(in Chinese)]
- [8] Yang H *et al.* Phys. Rev. E, 2001, 65 :016406
- [9] Pirri A N *et al.* AIAA, 1974 J, 12 :1254
- [10] Thompson M S *et al.* Proceedings of NASA JPL/MSFC/UAH 12th Annual Advanced Space Propulsion Workshop, University of Alabama in Huntsville, Huntsville, Alabama, April 3—5, 2001
- [11] Farbo R *et al.* J. Appl. Phys., 1990, 68 :775
- [12] Anderholm N C. Appl. Phys. Lett., 1970, 16 :775
- [13] Beverly R E, Walters C T. J. Appl. Phys., 1976, 47 :3485
- [14] Ageev V P, Barchukov A I. Acta Astronautica, 1980, 7 :79
- [15] Myrabo L N *et al.* AIAA, 98 - 1001, Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 36th, 1998
- [16] Simons G A, Pirri A N *et al.* AIAA, 1977, 15 :835

· 信息服务 ·



美国伦斯勒理工学院招生信息

JOIN OUR GRADUATE SCHOOL IN PHYSICS

Ph. D. in Department of Physics, Applied Physics, and Astronomy Areas of Research :Astronomy, Elementary Particles Physics, Nano-Structure Physics, Origins of Life, THz Imaging, THz Electronics.

Teaching, research assistantships and fellowships are available.

Application <http://www.rpi.edu/dept/grad-services/>

Information <http://www.rpi.edu/dept/phys/>

E-mail gradphysics@rpi.edu

· 物理新闻与动态 ·

太阳能利用前景光明

美国航空动力公司(Astropower, Inc.) 总裁 Allen Barnett 高度评价太阳的应用前景. 他认为, 太阳能的利用不仅可为发展中国家提供电力, 而且适用于电价较高的发达地区, 如美国加州. Barnett 说, 薄膜晶态 Si 电池将被证明是最成功的光伏转换技术. 最近, 他的公司已经发展了一种连续加工晶态 Si 膜的技术, 膜厚仅数 μm , 加工速率达 3.1m/min.

此外, 来自澳大利亚新南威尔士大学的 Martin Green 和他所领导的小组也正致力于开发新概念太阳能电池. 他们的一个重要设计是关于级联太阳能电池. 该器件由一系列堆叠的电池胞组成, 每一个胞被调谐到吸收特定的太阳光频段. 他们已经成功地制成了 Si 量子级联器件, 其中 Si 膜的厚度为 0.6—1.7nm, 它们可以被调谐到覆盖整个太阳光光谱, 并以 SiO_2 作为间隔物.

(中国科学院理化技术研究所 戴闻 编译自 American Physical Society, March Meeting News, 2003)