

文章编号: 0253-2239(2009)07-1751-05

# 光学与太阳能

于荣金

(燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要** 开发资源丰富、可再生、清洁的新能源是全球一项紧迫的战略任务。在概述现有能源技术的基础上,从光学和光学技术角度重点对太阳能的直接利用、太阳能电池以及太阳能分解水制氢进行了分析。指出了利用简单有效的太阳能跟踪聚焦系统,以及耐热、低损耗、低成本和宽光谱传输的空芯塑料光纤,可以加大对太阳能的直接利用和普及推广;在太阳能电池方面,应重点研究和发展各种薄膜太阳能电池,采用对可见、紫外和红外光谱吸收的、具有不同带隙的复合材料和采用多结器件,以进一步提高电池的转换效率和降低成本;在太阳能分解水制氢方面,应该把直射到地球表面的、从紫外-可见-红外的宽太阳光谱,利用空腔辐射器作一个变换,转换成绝大部分位于水分子有强烈吸收带的红外区。同时利用催化剂(敏化剂),对水进行红外光催化分解反应,或者利用红外多光子离解这有可能取得工业化规模制氢的突破。

**关键词** 太阳能; 日光照明; 太阳能电池; 太阳能分解水

**中图分类号** TK519 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092907.1751

## Optics and Solar Energy

Yu Rongjin

(College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

**Abstract** In view of the world's ever-increasing demand for energy, limitation of usable fossil fuels and the impact of large exhaust pollutant on the environment during their use, there is an urgent need to exploit new energy sources that are plentiful, renewable and clean. This paper introduces briefly energy source technologies now available, centres on the analyses of direct utilization of solar energy, solar cells and the decomposing water by solar energy from the optical and optical technological point of view. Direct utilization of solar energy can be expanded through a system of tracing and focusing sunlight with simplicity and low cost in combination with the heat-resisting, broad band transmissive, low-loss and inexpensive hollow-core plastic fibers. In solar cell field, the stress should be put on the research for various film solar cells except for improving the efficiency and reducing the cost for crystalline silicon solar cells. In decomposing water by solar energy, in order to obtain hydrogen, the stress should be put on the research for decomposing water by light catalysis. By means of transforming solar radiation spectrum into brightness maximum to be located in infrared region by using the cavity radiator, the most spectra can be absorbed by water, and which provides a new technological way to be probably worthy of exploration.

**Key words** solar energy; sunlight lighting; solar cell; decomposing water by solar energy

## 1 引言

光学是研究光的传播以及它和物质相互作用的学科。光学在经历长期的发展中,特别是上个世纪 60 年代激光出现之后,为人们认识世界和改造世界发挥了重要作用。各种光学器件、光学仪器和光学系统随处可见,光学、激光、光电子学及相关技术的

影响遍及工业、国防、医疗、信息、物理、化学、生物、材料、测控、天文和空间科学等几乎所有部门。

全球能源消耗受人们生活水平的不断提高、工业化发展以及人口增长的驱动,正在不可抗拒地增长,满足能源全球增长的需求,是未来社会最重要的挑战之一。现在,全世界总能耗约 13 TW

收稿日期: 2008-10-11; 收到修改稿日期: 2008-11-22

作者简介: 于荣金(1935—),男,教授,主要从事纤维光学、集成光学和导波光学等方面的研究。

E-mail: r.j.yu@163.com

( $TW=10^{12} W$ ), 预测 2050 年, 将需要约 30 TW。以美国为例, 能源的 85% 来自化石燃料 (fossil fuels), 这些燃料正在逐步减少; 同时, 化石燃料产生的温室气体, 促使全球变暖。因此就有紧迫发展新能源的要求, 而这些新能源应该资源是丰富的, 经济上是合理的, 更重要的是环境友好的。能源和环境的挑战, 引起了全世界的重视。我国政府更高度关注这一问题, 最近几年, 一直把“节能、减排”作为年度经济发展的硬指标。2008 年 1 月 10 日《科学时报》第一版报导“国际纯粹应用物理联合会 (IUPAP) 副主席陈佳洱院士最近从巴西带回了一封 IUPAP 主席关于能源问题的公开信, 其中提出物理学要注意两件世界大事: 能源短缺和气候变暖, 认为物理学如果不参加进来, 将很可能被边缘化。……北京大学甘子钊院士建议: 物理学已经为 IT (信息产业) 服务了 50 年, 但是现在要从 IT 转到 ET, 即服务能源 (Energy) 和环境 (Environment) 科技。……1998 年诺贝尔化学奖得主、美国凝聚态物理学家沃尔特·科恩最近几十年来一直关注能源问题, 其自费制作的纪录片《太阳的能量》将在世界范围内发行。”光学作为物理学的一部分, 应该、也可以在能源开发方面作出应有的贡献。

## 2 现有能源技术和太阳能

当今世界, 能源主要来自化石燃料, 即煤、石油和天然气。此外, 还有水 (力发) 电、风 (力发) 电、核电、太阳能、地热能、生物质能和海洋能等补充能源。人们还在探索其它能源技术, 如激光核聚变、氢能等。水电、风电、核电、地热能的利用, 技术上都比较成熟, 开发这些能源主要是加大投入, 并且风电现在已成为世界上最便宜的能源。激光核聚变研究是从上个世纪就开始的光学和激光技术在开发能源方面的先导和典范。光学在新能源开发中重点应该放在太阳能方面。

组成太阳的物质中 75% 是氢, 氢在持续地变为氦的聚变反应中, 释放出巨大的能量 (其中 99% 的能量集中在  $0.276\sim 4.96 \mu m$  波段之间), 扩散到太阳的表面, 并辐射到星际空间。其中向地球投射的太阳能为 173,000 TW (约为太阳辐射总能量的 20 亿分之一), 其中约有 30% (52,000 TW) 的太阳辐射功率被大气分子和灰尘反射回宇宙空间, 其余的 121,000 TW 中又有 40,000 TW 被大气所吸收, 所以穿过大气层到达地球表面的太阳辐射功率为 81,000 TW。它是目前全球能源总消耗量 (13 TW)

的 6230 倍。因此太阳可为人类提供一种丰富的、可再生的和清洁 (无污染) 的能源。太阳能的作用是巨大的。地球上的自然生态系统得以正常运转所需要的能量全部来自太阳; 化石燃料也是一种过去储存下来的太阳能, 在经漫长的地质年代形成的; 1973~1983 年间, 太阳能热水器和太阳能电池等产品开始实现商品化; 1972 年日本 Fujishima 和 Honda 对光照  $TiO_2$  电极导致水分解从而产生氢气这一现象的发现<sup>[1]</sup>, 揭示了利用太阳能分解水制氢的可能性, 引起在国际上持续至今对利用太阳能由水制氢的探索研究。到目前为止, 对太阳能的利用尽管进行了不少探索和研究, 但离人们充分利用太阳能的目标还很远。围绕降低成本、提高能量转换效率和生产效率、以及寻找太阳能利用新途径等方面, 还有许多技术障碍需要克服, 一些重大问题需要组织不同专业的人员进行攻关。

## 3 太阳能的直接利用

用光学领域发展起来的光导纤维、光电跟踪、聚焦元件和系统, 结合实际需要, 进行改进和设计之后, 可以为扩大太阳能的直接利用发挥重要作用。太阳光是直线传播的, 不能转弯, 因此在各种建筑物内、地下设施和地铁等太阳直射不到的地方, 就不能加以利用。如果利用耐热、低损耗、低成本和宽光谱传输的空芯塑料光纤<sup>[2]</sup>以及简单有效的太阳能跟踪聚光系统, 不仅可以有效地解决太阳光的传送, 还有可能大幅度降低此系统的成本, 从而在我国民用方面普及推广。这套跟踪采光和空芯塑料光纤系统, 不仅能用于照明, 还可将太阳光聚焦后, 通过光纤送入室内进行炊事、取暖和获得生活用热水。甚至可将室外的太阳光经聚焦后通过光纤传送进入室内层层叠起的太阳能电池板, 用有限的厂房, 把经受风雨灰尘侵袭的室外太阳能电池板搬进车间, 实现规模化太阳能发电。经聚焦后的太阳光, 由于增加了光子密度, 可以减少 p-n 结的接触电压损失, 还可把晶体硅太阳能电池板的输出增大, 减少晶体硅材料的用量, 从而降低成本、提高性价比。

## 4 太阳能电池

太阳能电池是太阳能利用很重要的一个方面。自 1954 年实用的第一块太阳能电池在美国问世以来, 2004 年底全球的装机容量已达 4330 MW 左右。到本世纪中叶, 将达到占世界总发电量的

10%~20%。现在太阳能电池以晶体硅(单晶、多晶和条状硅)占优势,常称之为第一代器件。在降低制造成本方面,需要材料较少、能在薄的和低成本衬底上,用高生产效率制作的薄膜技术是积极研究和发展的第二代器件,它们是以光吸收材料为基础,例如无定形硅(非晶硅)、多晶/无定形硅组合、硫系基薄膜( $\text{CuInSe}_2$  或 CIS,  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  或 CIGS)以及 II-VI 族半导体( $\text{CdTe}$ ,  $\text{CdSe}$  和  $\text{CdS}$  配合),还有量子点和有机聚合物太阳能电池等。今后,提高太阳能电池的光电转换效率和降低成本是各种新型太阳能电池的两大共同目标。采用新材料、新结构或新工艺制造新型太阳能电池,除了继续发展硅高效太阳能电池外,主要集中在各类薄膜太阳能电池的研发上。

太阳能电池类似于光电探测器,是一种光电转换器件。太阳能电池和光电探测器的不同之处(也是难点)是,前者覆盖从紫外、可见到红外的比较宽的波长范围,而后者往往是某一波长或某一波段。这就决定了单一的太阳能电池材料不可能将如此宽波长范围的光全部加以吸收和有效利用;而应该采用对可见、紫外和红外光吸收的、具有不同带隙的复合材料和采用多结器件,以提高电池的转换效率。就太阳能电池中最好的硅太阳能电池来说,它也只能吸收波长约  $0.35 \sim 1.15 \mu\text{m}$  的光,对小于  $0.35 \mu\text{m}$  和大于  $1.15 \mu\text{m}$  的光没有反应。因此单晶硅太阳能电池实验室的最高光电转换效率才接近 25%,商品化电池的转换效率还要低。太阳能电池材料的带隙如果大于太阳光谱中某一波长的光子能,则这一波长就不能被吸收利用;但如果采用窄带隙材料,尽管大于(以及等于)该带隙的太阳光谱都可以被吸收并产生光生载流子,但激发出电子-空穴对后剩余的能量转变为热能,不仅降低了光子能量的利用率,还给电池产生升温,而电池的光电转换效率随温度增加而下降。为了提高光电转换效率,在减少太阳能电池光照面的反射、解决电池在光子吸收前的光传导损失、以及光吸收后产生的光生载流子在内部复合和表面复合的损失,现在已有多种技术途径。从事光学薄膜、光电器件、集成光学器件的专业人员,对太阳能电池的材料、结构和制作工艺等改进和创新方面,可以贡献自己的智慧。值得一提的是美国斯坦福大学,该校的光子研究中心协同电气工程、材料科学、应用物理和化学工程等几个系的研究人员,在美国能源部、国家科学基金以及斯坦福全球气候和能源项目等支持下,正在研究开发有机聚合

物薄膜太阳能电池,包括小分子多层器件、混合聚合物器件和有机/无机半导体纳米结构混合物器件<sup>[3~5]</sup>。2008年6月24~25日还在斯坦福大学召开了“太阳能:高效新材料和纳米结构器件”方面的学术会议。

## 5 利用太阳能分解水制氢

氢能是除核能以外发热值最高的,是汽油发热值的 3 倍,是焦炭发热值的 4.5 倍;氢燃烧反应又生成水,资源可循环利用;氢本身无毒,是一种清洁能源;氢燃烧性能好,点燃快,与空气混合时有广泛的可燃范围,而且燃点高,燃烧速度快;用途广泛,可直接用作发动机燃料、化工原料、燃料电池,用氢替代煤和石油,无需对现有技术装备做重大改造,现有的内燃机稍加改装即可使用<sup>[6]</sup>。因此氢能有望在未来替代化石能源。2003年11月,包括美国、澳大利亚、巴西、加拿大、中国、意大利、英国、冰岛、挪威、德国、法国、俄罗斯、日本、韩国、印度和欧盟委员会的代表共同签署了“氢经济国际合作伙伴计划(IPHE)”参考条款,目的是建立一种合作机制,有效地组织、评估和协调各成员国,为氢能技术研究开发、示范和商业化活动提供一个能推动和制定有关国际技术标准与规范的工作平台。当前,为实现氢能利用还面临着几个重要问题。首先是要解决能大量、廉价的方式制取氢。在制氢方面,利用太阳能分解水制氢是值得进一步开发的重要技术途径,它符合资源丰富、可循环利用、清洁等新能源的各项要求。自 1972 年至今的 30 多年中,人们围绕利用太阳能分解水这一主题开展了各种研究,其中包括太阳能热化学裂解水制氢、太阳能光电化学过程制氢、太阳能光生物化学制氢、以及太阳能光伏发电电解水制氢等,取得了一定进展,但目前离有效、便宜和大量应用太阳能分解水还有很大差距。

水( $\text{H}_2\text{O}$ )在  $100^\circ\text{C}$  时,从具有分子间作用力的液体,克服了分子间的范德华引力,变成气体;但要打开  $\text{H}_2\text{O}$  分子的化学键,变成  $\text{H}_2$  和  $\text{O}_2$ ,在标准状态下,1 mol 水(18 g)分解成氢气和氧气需要约 237 KJ 的能量。热解水需要 2500 K 以上的高温热源,尽管聚焦型太阳能集热器的聚光比已达到 300~10000,太阳炉的温度可达到  $1200^\circ\text{C}$ ,抛物面反射镜集热器可达  $4000^\circ\text{C}$  的高温,但在这样的高温下,装置材料、分离氢气和氧气用的膜材料都无法工作。所以太阳能热化学裂解水制氢需要由吸热和放热几步循环反应所组成,从而降低水分解所需要的温度,

文献报导的各种热化学循环反应,反应温度为几百摄氏度。

在光作用下进行反应的光化反应是由于反应物分子吸收光量子,使分子处于电子激发态甚至电离、分解而导致的化学反应。光化反应所需的活化能来自于吸收光辐射,而进行热反应所需的活化能,来自于反应物分子在频繁碰撞、交换能量过程中所获得的。光化反应的速率其温度系数要比热反应低得多,有的光化反应速率几乎与温度无关。由于光化反应的选择性、反应速度快、能量利用率高等一系列优点,因此在利用太阳能分解水的研究中,太阳能光电化学过程制氢获得了进一步发展,其中光电催化剂材料是关键。与太阳能电池类似,解决太阳能光谱中大部分波长光的吸收是难点。经过 30 多年的研发,光电催化剂已由最初只能吸收紫外线的半导体  $\text{TiO}_2$ ,发展到可吸收可见光的复合层状物等多种类型催化剂。

在直射到地球表面的太阳光谱中,紫外波段( $\lambda < 0.4 \mu\text{m}$ )约占 8.7%,可见光波段(波长为  $0.4 \sim 0.75 \mu\text{m}$  之间)约占 43%,红外波段( $\lambda > 0.75 \mu\text{m}$ )约占 48.3%,而能量分布最大值所对应的波长是  $0.475 \mu\text{m}$ 。水对于紫外线和可见光是透明的;而水分子对红外辐射有强烈的选择性吸收作用,如水蒸气在  $0.94 \mu\text{m}$ 、 $1.14 \mu\text{m}$ 、 $1.38 \mu\text{m}$ 、 $1.87 \mu\text{m}$ 、 $2.7 \mu\text{m}$  和  $3.2 \mu\text{m}$  波长等都有吸收带,可是太阳辐射光谱在穿过大气层时这些红外辐射恰好又被吸收掉了,见图 1<sup>[7]</sup>。因此地面上接收到的太阳辐射光谱直接用来光解水是困难的。在这里提出一种构想:把太阳光谱作一个变换,即把太阳光变换成适合水吸收的波长范围。由于绝对黑体在任何温

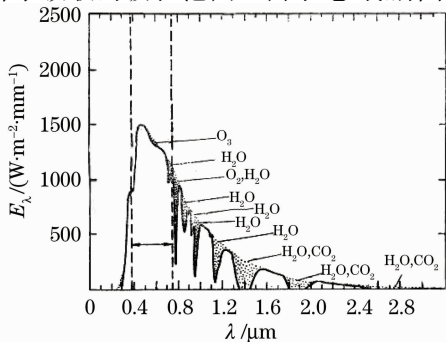


图 1 在平均地一日距离上,标准海平面太阳光谱辐照度  $E_\lambda$  与波长  $\lambda$  的函数关系

Fig. 1 On mean earth-to-sun distance, solar spectral irradiance  $E_\lambda$  at standard sea level versus wavelength  $\lambda$

度下都可把照射在其上任何频率的辐射能完全吸收,而用空腔辐射器可以制造出非常理想的“绝对黑体”。因此,可以用强辐射耐火砖(温度  $500 \sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ,发射率  $0.80 \sim 0.90$ )构建一个空腔辐射器,采用聚焦太阳能把它加热到所需温度。再注意到 O-H 的特征频率为  $3730 \sim 3500 \text{ cm}^{-1}$ ,其相应的波长为  $2.681 \sim 2.857 \mu\text{m}$ 。由维恩位移定律知:温度  $T$  和峰值波长  $\lambda_M$  的关系为  $\lambda_M T = b$ ,其中  $b$  是维恩常数( $b = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ )。从维恩位移定律计算可知:对应峰值波长  $2.681 \sim 2.857 \mu\text{m}$  范围的绝对温度  $T$  范围为  $1081 \sim 1014 \text{ K}$ (即  $808 \sim 741 \text{ }^\circ\text{C}$ )。在绝对温度  $1081 \text{ K}$  和  $1014 \text{ K}$  时,黑体的光谱亮度  $L_\lambda$  与波长  $\lambda$  的关系,可用普朗克方程计算,结果如图 2 所示。这样就可把原来直射地面的太阳光谱中能量分布最大值所对应的波长( $0.475 \mu\text{m}$ )转变成光谱亮度最大值所对应的波长( $2.681 \sim 2.857 \mu\text{m}$ )。并且在这个最大值范围两边,布满了水分子的吸收带,因此这一转换非常有利于水对能量的直接吸收。由于催化剂能降低反应的活化能,加快化学反应的速率,因此在空腔辐射器中加入催化剂(敏化剂)更有利于水的光解,或者利用红外多光子离解,先用强红外激光辐照,吸收少数几个光子,进入一个振动态越来越密集的准连续态处于准连续态的分子迅速地、连串地吸收许多个光子;当吸收的光子能超过分子的离解阈值后,发生离解反应。

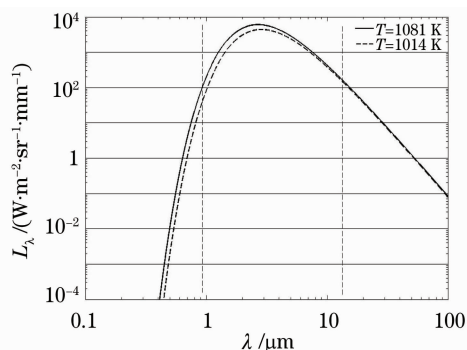


图 2 在温度  $1081 \text{ K}$  和  $1014 \text{ K}$  时,黑体光谱亮度  $L_\lambda$  与  $\lambda$  的函数关系

Fig. 2 Blackbody spectral brightness at  $1081 \text{ K}$  and  $1014 \text{ K}$  versus wavelength  $\lambda$

地球上丰富的水,全世界的总水量约有  $14 \times 10^8 \text{ km}^3$  之多,但海洋面积占全球面积的 71%,含盐的海水占全部水资源的 97.3%,淡水只占 2.7%(其中有 68.7% 是以冰川和冰帽的形式存在于南北极和高山地区)。我国有很长的海岸线和海

岛,可以利用太阳能来分解海水,一旦技术得以突破,从北到南在沿海可建立一批太阳能分解水制氢的企业,工艺流程如图 3。海水蒸发以后,残留的盐等固体物可以综合利用。

早在 1870 年凡尔纳在他的科幻小说《神秘岛》中曾写道:“我相信总有一天可以用水来作燃料,组成水的氢和氧可以单独地或者合在一起使用。这将

为热和光提供无限的来源,所提供的光和热的强度是煤炭所无法达到的。所以我相信,一旦煤矿枯竭了,我们将会使用水来供热和取暖。水将是未来的煤炭。”尽管现在实现这一科学幻想还有许多障碍,但是相信人类总有一天会把它变成现实,通过太阳能分解水,用水来做燃料。

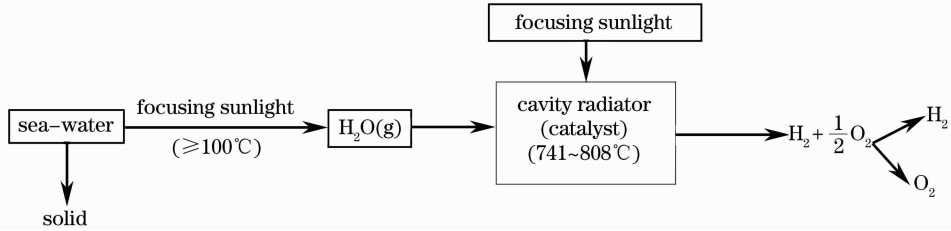


图 3 工艺流程图

Fig. 3 Process flow diagram

## 6 结 论

初步分析研究表明:光学和光学技术在太阳能的进一步利用中,通过耐热、低损耗和廉价的塑料空芯光纤,以及简单便宜的太阳跟踪聚焦系统,可以把太阳能引入室内照明、炊事和取暖等,扩大对太阳能的直接利用;在太阳能电池方面,除改进晶体硅太阳能电池效率和降低成本外,重点应研究和各种薄膜太阳能电池;在太阳能分解水制氢方面,重点应加强光催化分解水的研究;利用空腔辐射器把太阳辐射光谱转换成光谱亮度最大值在红外区的办法,有利于水对大部分光谱的直接吸收,可能是值得探索的一条技术新途径。

## 参 考 文 献

1 A Fujishima, K Honda. Electrochemical photolysis of water at a

- semiconductor electrode [J]. *Nature*, 1972, **238**(5358): 37~38
- 2 Chen Mingyang, Yu Rongjin, Tian Zhenguo *et al.*. Optical and mechanical properties of hollow-core fibers with cobweb cladding structure [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(2): 63~65
- 3 B Kippelen, Organic photovoltaics [J]. *Optics & Photonics News*, 2007, **18**(10): 26~33
- 4 G. C. Bjorklund, T. M. Baer Organic thin-film solar cell research conducted at stanford university[J]. *Photonics Spectra*, 2007, **41**(11): 70~76
- 5 G. C. Bjorklund, T. M. Baer. Organic thin-film solar cell research at stanford university [J]. *Photonics Spectra*, 2007, **41**(12): 56~62
- 6 Ding Fuchen, Yi Yufeng. Techniques of fabricating and storing hydrogen [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006  
丁福臣, 易玉峰. 制氢储氢技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006
- 7 Yang Chenhua, Mei Suisheng, Lin Junting. Laser and infrared technology handbook [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1990. 28  
杨臣华, 梅遂生, 林钧挺. 激光与红外技术手册 [M]. .北京: 国防工业出版社, 1990. 28