

文章编号: 1005-5630(2011)05-0075-06

用于植物照明的 LED 阵列设计*

周德涛, 范广涵, 许毅钦, 陈肇飞

(华南师范大学 光电子材料与技术研究所, 广东 广州 510631)

摘要: 基于温室植物光学作用和光形态调节原理, 设计了两种用于植物照明的发光二极管(LED)阵列。通过推导阵列的辐射照度叠加公式并根据叠加公式对阵列进行仿真优化。两种阵列均采用红蓝 LED 相结合的方式排列, 其中阵列 1 红光和蓝光 LED 的数量比是 1:1, 阵列 2 红光和蓝光 LED 的数量比是 4:1。通过光学模拟软件 Tracepro 对照射平面进行辐射照度均匀性分析, 经过优化后的阵列 2 在照射平面上辐射照度均匀性优于阵列 1, 并且阵列 2 的 LED 间距较大, 更有利于整个 LED 阵列的散热。该结果为 LED 植物照明灯的阵列设计提供参考。

关键词: 应用光学; LED 阵列; 植物照明; 辐射照度均匀性

中图分类号: TN 312.8 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2011.05.016

Design of LED arrays used for plant illumination

ZHOU Detao, FAN Guanghan, XU Yiqin, CHEN Zhaoifei

(Institute of Optoelectronic Materials and Technology, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: Based on the photosynthesis and photomorphogenesis of greenhouse plant, two kinds of light emitting diode (LED) arrays for plant illumination were designed. The irradiance superposition formula of the LED array was derived, and then the LED arrays were simulated according to the formula. The red and blue LEDs were uniformly arranged, the proportion of red LEDs to blue LEDs is 1:1 in the first array, and the proportion of red LEDs to blue LEDs is 4:1 in the second array. Experimental results analyzed by TracePro software show that the second LED array has an advantage over the first one on irradiance uniformity, and the second LED array perform better at cooling because the spacing between LEDs become larger. The LED arrays distributions applied to plant illumination were achieved and reliable reference for the design of LED array is provided.

Key words: applied optics; LED arrays; plant illumination; irradiance uniformity

引言

近年来随着发光二极管(LED)技术的飞速发展^[1-3], 其成本越来越低, 低能耗的冷光源 LED 具有一系列传统电光源无可比拟的优点不具备的优点: 体积小、寿命长(理论寿命为 10^5 h)、光谱分布较窄、反应速度快、发光效率高、发光强度稳定^[4,5]以及不同峰值波长的产品丰富等而日益受到关注, 将是未来温室植物生产中的一种主要人工补光光源。当前单颗超高亮度 LED 的发光强度还不足于供给植物正常的生长

* 收稿日期: 2011-05-12

基金项目: 广东省教育部产学研资助项目(2009B090300338)

作者简介: 周德涛(1986-), 男, 广东汕头人, 硕士研究生, 主要从事 LED 照明系统光学设计方面的研究。

发育。但是多颗 LED 通过组合成阵列完全能满足温室植物的光需求。

光环境是温室气候环境的主导因子。光不仅是植物进行光合作用的能量源,也是光形态形成的信号源。叶绿素是植物执行光合作用的主体,也是植物体内最丰富的色素,其最善于吸收红光和蓝光,叶绿素 a 在 640~660nm 的红光区域有一个强吸收峰;叶绿素 b 在 430~450nm 的蓝光区域有一个强吸收峰^[6]。不同波长的辐射对于植物的影响作用不同,园艺学家认为 450nm 的蓝光对于植物叶片和根系的生长具有很重要的作用,600~700nm 的红光却有利于茎的生长,并促进植物的开花和叶绿素的形成。有研究认为红、蓝光 LED 组合可以通过增加净光合速率以促进植物的生长和发育,因为红光与蓝光的光谱能量分布与叶绿素吸收光谱一致^[7]。

适当的红光(600~700nm)与蓝光(400~520nm)之比即 R/B 才能保证培育出形态健全的植物。目前有不少采用红蓝 LED 相结合作为植物光源的报道^[8,9],红光 LED 数量都多于蓝光 LED,并且是通过增加或减少红蓝 LED 的数量来得到所要的 R/B 比例,在实验操作上十分不便。文中设计两种 LED 阵列都通过分别控制红光和蓝光 LED 的正向工作电流来实现不同的 R/B 比例,两种 LED 阵列均采用模块化概念设计,以利于安装、更换和拓展之便捷。

1 LED 阵列设计

由于 LED 的高指向性,必须经过合理的阵列设计才能实现在照射面积上 R/B 比例均匀。现以红光、蓝光两种 LED 组合在一起,设计了两种不同的用于植物照明的 LED 阵列,来实现照射区域的 R/B 尽可能均匀。第一种 LED 阵列红光和蓝光 LED 的数量比是 1:1,均匀分布在电路基板上,其中每行每列相邻红光 LED 间距与相邻蓝光 LED 间距相等,如图 1(a)所示。第二种 LED 阵列红光和蓝光 LED 的数量比是 4:1,四个红光 LED 分别位于正四边形的顶点,每个蓝光 LED 位于四个红光 LED 的中心位置,相邻蓝光 LED 间距是相邻红光 LED 间距的 2 倍,如图 1(b)所示。

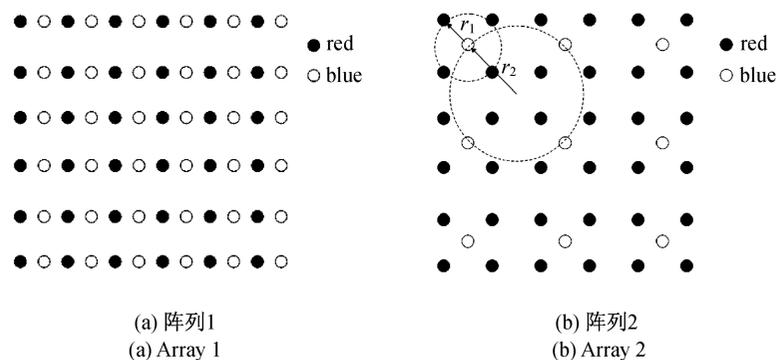


图 1 LED 阵列分布

Fig. 1 Layout of LED array

2 LED 阵列照度的计算

通常 LED 所照射的目标距离比 LED 本身大很多,在该情况下,可以将 LED 简化为一个有一定空间光强分布的点光源^[10,11]。点光源的特点是能以 4π 立体角向周围空间发出相同发光强度的光辐射。设面元 dS 接受 LED 点光源 S 的光照,点元光束的光轴与面元的法线 N 之间的夹角为 θ ,面元上的辐射照度为^[12,13]:

$$E_e = \frac{d\phi_e}{dS} = \frac{I_e \cos\theta}{r^2} \quad (1)$$

其中 E_e 为辐射照度,单位为 W/m^2 ; ϕ_e 为辐射功率,单位为 W; I_e 为辐射强度,单位为 W/sr ,

θ 为点光源发出的元光束的光轴与面元的法线 N 之间的夹角。其中 LED 的辐射强度不是一个理想的余弦分布,该分布可以表示为:

$$I_e(\theta) = I_{e0} \cos^m \theta \quad (2)$$

m 值取决于芯片相对于 LED 封装透镜曲面中心的距离。如果芯片位置与曲面中心对应一致,则 $m \approx 1$, 光源则近似为一个完美的朗伯源。而一些典型 LED 的 m 值会大于 30, 则光照度分布从中心向边界降得非常快。 m 的取值可以简单地通过 $\theta_{1/2}$ 来确定:当 $\theta = \theta_{1/2}$ 时, $I_e(\theta) = \frac{1}{2} I_{e0}$, 则有 $\frac{1}{2} I_{e0} = I_{e0} \cos^m \theta_{1/2}$ 。即:

$$m = \frac{-\ln 2}{\ln(\cos \theta_{1/2})} \quad (3)$$

当 LED 照射到与其光轴方向垂直的平面时,在该平面上的辐射照度分布为:

$$E_e(r, \theta) = E_{e0}(r) \cos^m \theta \quad (4)$$

由式(1)得到:

$$E_{e0}(r) = \frac{I_{e0}}{r^2} \quad (5)$$

变换坐标得:

$$\cos \theta = \frac{z}{r} = \frac{z}{\sqrt{(x-X)^2 + (y-Y)^2 + z^2}} \quad (6)$$

把式(5)和式(6)代入式(4)可得:

$$E_e(x, y, z) = \frac{z^m I_{e0}}{[(x-X)^2 + (y-Y)^2 + z^2]^{\frac{m+2}{2}}} \quad (7)$$

由于 LED 是一种非相干光源,因此多个 LED 对平面上某一区域的辐射照度为其单个的叠加,对于如图所示 4 个 LED,设环的半径为 r ,这样目标平面上的辐射照度为 4 个 LED 辐射照度值的叠加,则有:

$$E_e(x, y, z) = z^m I_{e0} \sum_{n=1}^4 \left\{ \left[x - r \cos\left(\frac{2\pi n}{4}\right) \right]^2 + \left[y - r \sin\left(\frac{2\pi n}{4}\right) \right]^2 + z^2 \right\}^{-(m+2)/2} \quad (8)$$

式(8)中, r 为四个 LED 所在圆环的半径,如图 1 所示。若 r 增大,则四个 LED 照射的范围也越大,但在原点附近的区域照度往往低于其两边的照度,造成照度的均匀性不好,故所要考虑的是 r 增加到多大时,原点附近的区域的光照度不至下降很多,现可以根据衍射中的爱里斑得到启发,对 E_e 进行二次微分并使 $x=0, y=0$ 处, $\frac{\partial^2 E_e}{\partial x^2} = 0$, 得到原点附近照度均匀的条件:

$$r_{\max} = \sqrt{\frac{2}{m+2}} z \quad (9)$$

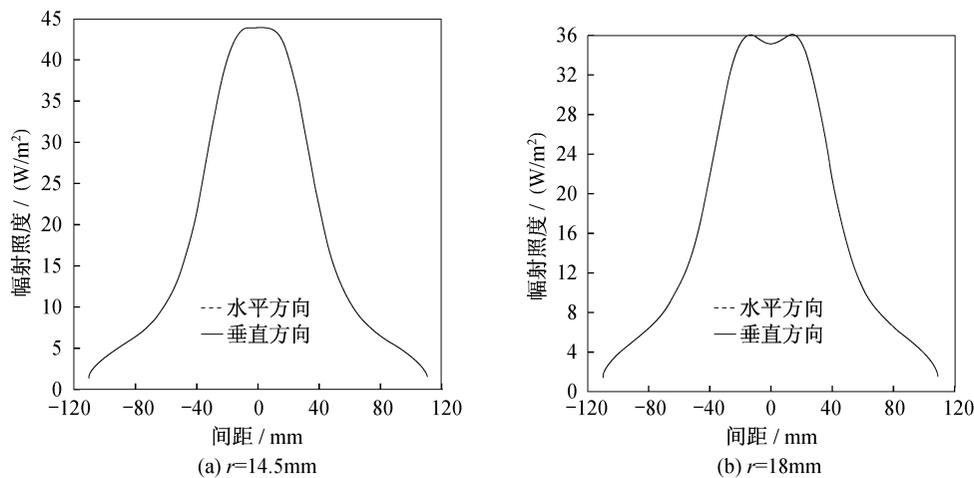


图 2 不同间距的 4 个 LED 照度分布
Fig. 2 Irradiance distribution of four LEDs

取 $z=100\text{mm}$, $m=92.6$ ($\theta_{1/2}=7^\circ$), 得到 $r_{\text{max}}=14.5\text{mm}$ 。

当 r 增加到 14.5mm 时, 原点附近区域的照度不至于下降很多, 通过光学软件 Tracepro 仿真验证计算结果, 如图 2 所示, 当 $r=14.5\text{mm}$ 时, 原点附近照度较均匀。

3 两种 LED 阵列仿真及分析

3.1 LED 阵列 1

第一种 LED 阵列, 采用 4 个如图 1(a) 所示阵列模块, 红光和蓝光 LED 各 144 颗, $\theta_{1/2}$ 均为 7° , 根据上述的计算结果, 取 $r_1=r_2=14\text{mm}$, $z=100\text{mm}$, 用 Tracepro 分别考察红光和蓝光 LED 在照射面内的辐射照度分布, 如图 3 所示。

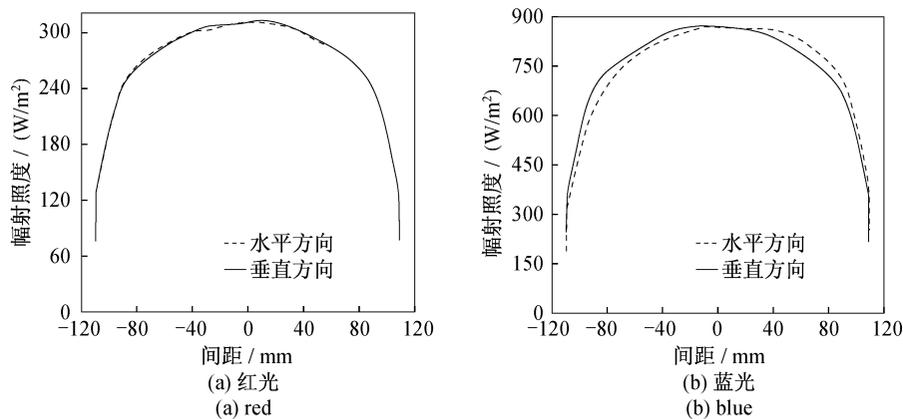


图 3 阵列 1 组合单元红蓝光 LED 辐射照度分布

Fig. 3 Irradiance distribution of red and blue LEDs arranged with the first array

从图 3 中可以看出红光和蓝光 LED 在照射面内原点附近的辐射照度分布比较均匀, 红光 LED 在照射面内辐射照度分布能保持较好的对称性, 而蓝光 LED 在照射面内水平方向上的辐射照度分布对称性比较差。因为采用阵列 1 作为植物光源, 在对 R/B 分布均匀性要求高的植物照明实验是不适合的, 所以有必要对红蓝 LED 的阵列进行重新设计。

3.2 LED 阵列 2

第二种 LED 阵列采用 4 个如图 1(b) 所示阵列模块, 红光 LED 共 144 颗, 蓝光 LED 共 36 颗, 红光和蓝光 LED $\theta_{1/2}$ 均为 7° , 取 $r_1=14\text{mm}$, $r_2=28\text{mm}$, $z=100\text{mm}$, 经过 Tracepro 软件的模拟分析, 照射面内红光的辐射照度均匀性较好, 蓝光辐射照度均匀性很差, 如图 4 所示。

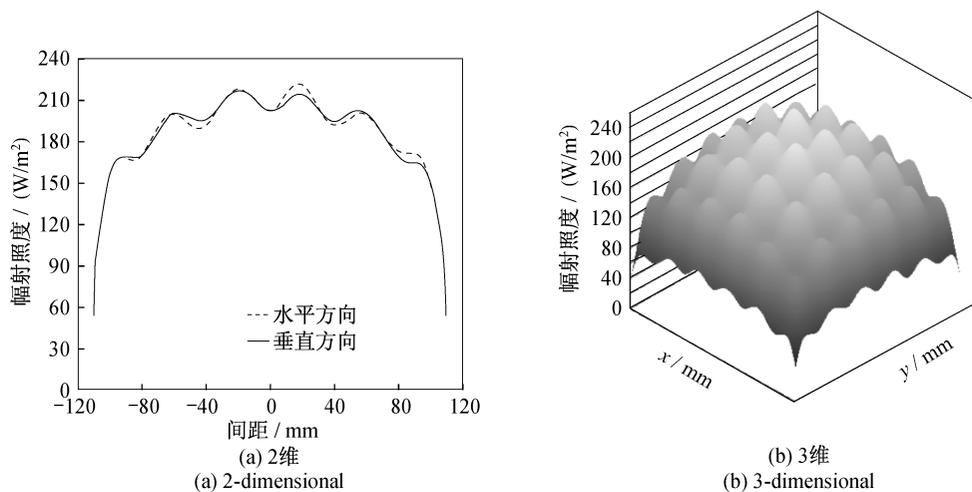


图 4 阵列 2 组合单元蓝光 LED(半强度角 7°) 辐射照度分布

Fig. 4 Irradiance distribution of blue LEDs ($\theta_{1/2}=7^\circ$) arranged with the second array

对于生物光源来说其中的一个重要要求是照射面内的辐射照度的分布均匀^[14]。由式(3)和式(9)可知,通过增大蓝光LED半强度角 $\theta_{1/2}$,可以增大蓝光LED的 r_{\max} ,从而使照射面内蓝光辐射照度比较均匀,当满足 $r_2 < r_{2\max} = \sqrt{\frac{2}{m_2+2}}$ 时,照射面内蓝光能保持较好的辐射照度均匀性,则有 $m_2 < 23.5$ ($\theta_{1/2} > 13.85^\circ$)。选择蓝光LED半强度角 $\theta_{1/2}$ 为 14° ,可以得到如图5所示的蓝光辐射照度分布图,从图5中可以看到蓝光辐射照度分布曲线平坦程度接近图3(a)红光LED辐射照度分布曲线,说明通过计算分析得到的结果能够通过光学软件的模拟得到了验证。

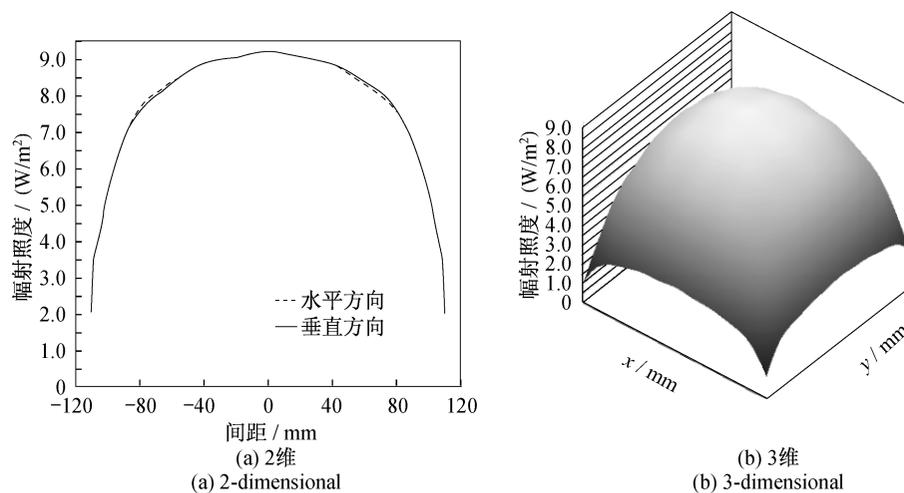


图5 阵列2组合单元蓝光LED(半强度角 14°)辐射照度分布图

Fig. 5 Irradiance distribution of blue LEDs($\theta_{1/2} = 14^\circ$)arranged with the second array

4 结论

LED光源在植物生长中的应用,作为LED非视觉照明应用的新领域,近年引起国内外的关注。照射面内的辐射照度的分布均匀性对于植物生长研究是非常重要的,目前针对于植物照明的LED阵列设计还比较少,因此通过推导LED阵列的辐射照度叠加公式并根据叠加公式对阵列进行仿真优化,设计两种不同分布的红蓝LED阵列。对比两种LED阵列在照射面辐射照度的均匀性,阵列2的辐射照度均匀性优于阵列1,并且阵列2的相邻LED间距较大,更有利于LED阵列的整体散热。虽然阵列2蓝光LED的辐射照度较阵列1蓝光LED辐射照度小很多,但是在实际应用中可以通过采用合适功率的蓝光LED,输入适当的正向工作电流来得到植物照明所需的R/B比。模块化的设计概念既为LED植物照明灯的安装、组合不同面积的LED阵列提供便捷,又能保持照射平面上较好的R/B均匀性。

参考文献:

- [1] 甘彬,冯红年,金尚忠.大功率白色发光二极管的特性研究[J].光学仪器,2005,27(5):33-37.
- [2] 缪建文,宋国华,宋建新,等.封装对 $\phi 5$ 白光LED寿命的影响研究[J].光学技术,2009,35(6):915-918.
- [3] 陈波,李伟平,黄杨程,等.一款LED后位灯的光学设计与仿真[J].光学仪器,2006,28(5):37-42.
- [4] 任建伟,麦镇强,万志,等.星上LED定标光源的可行性研究[J].光学精密工程,2008,16(3):398-405.
- [5] 麦镇强,李凤有,任建伟,等.星上定标光源LED长期工作的稳定性[J].发光学报,2007,28(5):753-758.
- [6] 潘瑞焜,董恩德.植物生理学[M].北京:高等教育出版社,2001.
- [7] GOINS G D, YORIO N C, SANWOM M, et al. Photomorphogenesis, photosynthesis, and seed yield of wheat plants grown under light emitting diodes(LEDs) with or without supplemental blue lighting[J]. *J Exp Bot*, 1997, 48: 1407-1413.
- [8] TUONG-HUAN L V, TANAKA M. Effects of red and blue light-emitting diodes on callus induction, callus proliferation, and protocorm-like body formation from callus in *Cymbidium* orchid[J]. *Environment Control in Biology*, 2004, 42(1): 57-64.

- [9] NHUT D T, HONG L T A, WATANABE H, *et al.* Growth of banana plantlets cultured in vitro under red and blue light-emitting diode(LED) irradiation source[J]. *Acta Hort*, 2002, 575: 117-124.
- [10] 蒋金波, 杜雪, 李荣彬. 自由曲面的 LED 路灯透镜设计[J]. *液晶与显示*, 2008, 23(5): 589-594.
- [11] 汪继凡. 半导体照明光源的组装与测试[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [12] 胡海蕾. LED 照明光学系统的设计及其阵列光照度分布研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2005.
- [13] 王乐. LED 应用于照明的计算和仿真[J]. *照明工程学报*, 2007(1): 25-30.
- [14] 刘江, 刘承宜, 杨友源, 等. 用于细胞及组织培养的中等强度 LED 生物光源[J]. *光学技术*, 2003, 29(5): 526-533.



中国学生在哈佛大学做博士后研究发现 人工界面改写光的反射和折射定律

光的折射和反射定律是几何光学的基础。但是美国哈佛大学物理学家用一系列实验演示了光线的传播可以不遵从这些经典定律。这意味着,或许有一天当你用一块平面镜端详自己容貌时,看到的却是哈哈镜的变形效果。

光在不同介质中的传播速度不一样。当一束光从空气中斜射向水中,光束的传播方向会发生改变,这就是所谓的折射现象。它的准确表述即折射定律是很多年前由物理学家斯涅尔、数学家笛卡尔以及费马确立的。这一定律表明,光线在界面的折射角仅由光在两种物质中的传播速度决定。而早在古希腊时期由欧几里德发现的反射定律更简单:光的反射角等于入射角。

经典的反射和折射定律都很自然地认为一个界面仅仅是区分两种物质的理想边界,换句话说,是两种介质而不是它们的截面影响了光的传播。哈佛大学研究人员的创新在于意识到界面可以成为决定光的传播的因素。他们的实验表明,精巧设计的界面能够干预光的传播。

研究人员利用硅片和空气界面处一层薄薄的金属阵列来演示一系列违背经典反射和折射定律的现象。这个阵列中的每个组成单元都类似微小的英文字母“V”,其大小和间距都远小于光的波长以及入射光束横截面的尺寸。这些“V”字形的单元的大小、夹角和朝向都不同,这样设计是为了控制光波和不同单元的相互作用时间:每个金属“V”都类似一个光的陷阱,能够将光波“囚禁”一段时间再释放出来。

阵列的设计使得这个“囚禁”时间沿界面从右向左线性增加,这样即使垂直入射,光束不同部分经历不同的时间延迟,透射以及反射光束就不再沿着垂直于界面的方向传播了。而当光以倾斜的角度入射,按不同的“界面”设计,反射和折射光可以被操纵朝向任何方向。反射角不一定等于入射角,反射光甚至可以被“反弹”回光源方向,而不是像一般情况那样折向远离光源方向。这就是平面镜可以有哈哈镜的效果的原因。

这项成果 9 月 2 日发表在美国新一期《科学》杂志上,第一作者虞南方目前在哈佛大学工程和应用科学学院做博士后研究,虞南方 2004 年本科毕业于北京大学电子学系,2009 年在哈佛大学获博士学位。

利用界面来控制光束不同部分的时延是一个具有革新意义的概念。虞南方告诉新华社记者,他们已用这种人工界面产生了“光涡旋”,这种奇异的光束在空间里螺旋前进,因而可以用来操纵旋转微小的悬浮颗粒。他预计,这一概念将衍生出一系列有用的光学元件,比如可以纠正相差的超薄平面聚焦镜片、可以采集大范围入射阳光的太阳能汇聚装置。哈佛大学目前已就这一成果提出专利申请。

(摘自《科技日报》)