

函件

PUBLISHED ONLINE： 19 JANUARY 2014 |[DOI：](http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nnano.2013.286) [10.1038/NNANO.2013.286](http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nnano.2013.286)

一 种纳米光子 太阳能 热光伏 器件

安德烈·莱纳特1， 大卫·比尔曼1， 南英淑1，4， 沃克 R.陈2，3， 伊万·塞拉诺维奇' 3， 马林·索尔雅克' 2，3 和伊芙琳 N.王1\*

从阳光发电的最常见方法是光伏，其中太阳光直接激发半导体中的电子 - 空穴对，或太阳能热，其中阳光驱动机械热机。光伏发电是间歇性的，通常只能有效地利用一部分太阳能频谱，而小型热机的内在不可逆性

光伏带隙*（E*g）和低于带隙的能量的低发射率。为了激发足够的热模式以在带隙上方大量发射，发射器温度i应该大约[12](#_bookmark4)足够高，以至于普朗克的黑体峰值重合

带隙;换句话说，根据维也纳的位移定律，

*T*选择≈ 2336 [K eV−1]·*E*

和 g

使太阳能热学方法最适合 公用事业规模

发电厂。因此，对太阳能发电混合技术的需求日益增加[1，2](#_bookmark14)。通过转换

发射器的高温运行对高效的STPV功率转换提出了两个关键挑战：收集阳光

选择

阳光转化为热发射调谐到正上方的能量

高效达到 *T*e

并将光谱选择性保持在较高水平

使用热吸收器-发射器的光伏带隙， 太阳能

热光伏发电承诺利用这两种方法的好处：高效率，通过利用整个太阳光谱[3-5;](#_bookmark15)可扩展性和紧凑性，因为它们的固态性质;和调度性，由于使用热或化学手段储存能量的能力[6-8。](#_bookmark18)然而

温度。过去的STPV实施例依赖于内在

钨等材料的性能[9，10](#_bookmark19).对于吸收器，有效提高材料固有太阳能吸收性的一种方法是使用宏观腔体几何形状。由于增强吸收所需的腔的高纵横比，这种方法通常需要高水平的光学浓度

选择

有效收集吸收器和光谱中的阳光

到达  *T*e

（例如，3，183 次，由数据 和

发射器中的控制 在 高

工作温度。这个缺点限制了以前这种转换方法的实验演示

阿尔戈拉9，和4，600倍，由弗拉索夫*等人使用。*[10）。](#_bookmark20)如此高的光学浓度反过来又需要具有低光学效率（ho 65%）的复杂系统[9。](#_bookmark19)对于发射器，

选择

≈

效率在1%左右或以下（参考文献9-11）。在这里， 我们 报告

钨的固有光谱选择性在*钨电温度*下较差

因为

在一个完整的太阳能热光伏设备上 ，这要归功于

吸收剂-发射极表面的纳米光子性质达到3.2%的实验效率。该器件在同一基板上集成了一个多壁碳纳米管吸收体和一个一维Si/SiO2光子晶体发射器，吸收器-发射器区域优化为

调整设备的能量平衡。我们的设备是平面和紧凑的，可以成为高性能太阳能热光伏能量转换的可行选择。

由于入射阳光没有一部分直接到达光伏电池，因此太阳能热光伏（STPV）的性能依赖于几个中间能量转换步骤的效率。光学集中的阳光在吸收器中转化为热量，吸收器温度升高，热量传导到发射器，热发射器热辐射到光伏电池，辐射最终被利用来激发电荷载流子并产生电力[（图](#_bookmark0)1a）。总效率*h*stpv可以表示为光学效率的乘积。

聚焦太阳光*（h*o），转换和

将阳光作为热量传递到发射器（h t），以及从热发射产生电力的效率*（h*tpv）：

*h*stpv = *h*o*h*th t*h*tpv

热光伏 （TPV） 效率*h*tpv 取决于

发射率 a t low 光子能量 （，*E*g） incr缓和与坦佩rature， a自带一 inc r在电 resis中缓和蒂维特y[13](#_bookmark5).Ultimatel y ，r 依赖于 materials 的内在光谱 r al properties for

吸收器-发射器将先前报道的实验性STPV的转换效率限制在1%左右（参考文献9-11）。

为了提高吸收器 - 发射器的性能，研究人员研究了结构表面[的设计5，6，14-21，](#_bookmark17)其光谱特性接近理想STPV组分的光谱特性（特别是使用光子晶体进行控制窄带选择性发射状态的光子密度[5，6，14-20）。](#_bookmark17)使用逼真的纳米光子表面的模拟研究预测STPV效率超过40%（参考文献5，15，21）。虽然内在材料特性对温度敏感，但表面结构提供了一定程度的光谱可调性，与温度无关。然而，这些表面尚未集成到在足够高的温度下工作的STPV器件中，以实现有效的功率转换。

在我们的器件中，吸收器-发射器的光谱特性是通过在紧凑的平面布局中进行表面纳米结构定制的[（图](#_bookmark0)1a，b）。吸收器-发射器模块由一系列多壁碳纳米管（MWNTs）组成，作为太阳能吸收体和

一维Si/ SiO2光子晶体（1D PhC）作为选择性发射器。我们将发射器与吸收器面积比（AR 1/4 *A*e/*A*a）从1变为10，以实现最佳性能。随着面积比的增加，我们为吸收器提供足够的热量-

选择

发射器的光谱属性和温度。光谱

发射器达到 Te

通过增加辐照度水平 和

对于上述能量，选择性发射器应具有高发射率

利用纳米管阵列的高吸收率 。 烫的

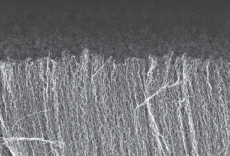
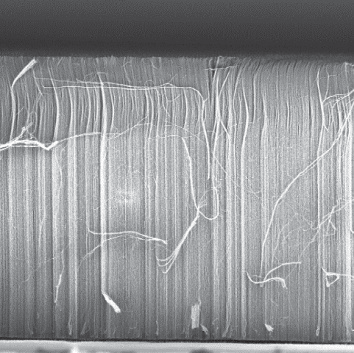
1麻省理工学院机械工程系设备研究实验室，77 Massachusetts Avenue，Cambridge，Massachusetts 02139，美国，2 麻省理工学院电子研究实验室of Technology， 77 Massachusetts Avenue， Cambridge， Massachusetts 02139， USA， 3 Institute for Soldier Nanotechnology， Massachusetts Institute of Technology， 77 Massachusetts Avenue， Cambridge， Massachusetts 02139， USA， 4 Department庆熙大学机械工程系，韩国龙仁446-701。 \*电子邮件：  [enwang@mit.edu](mailto:enwang@mit.edu)

126 自然纳米技术|第9卷| 2014年2月 |[www.nature.com/naturenanotechnology](http://www.nature.com/naturenanotechnology)

NATURE 在O技术LOGY [二：](http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nnano.2013.286) [10.1038/南O.2013.286](http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nnano.2013.286)

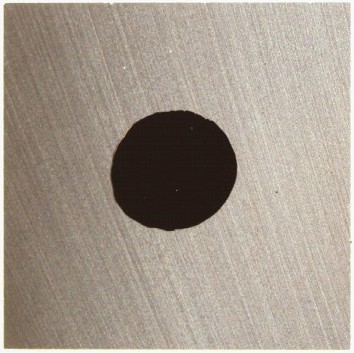
函件

**c d**



2M米

50M米



在

断续器

吸收器面积，A a

1 毫米

**a** 光圈

盾

真空

阳光

吸收

热 管理

是的

热 流

支持

发射

热 发射

负荷

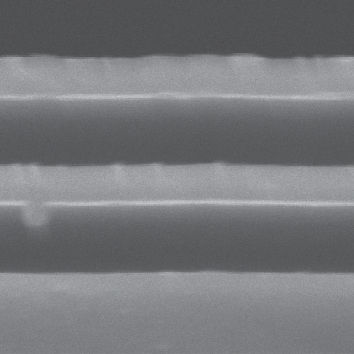
+

光伏 电池

−

电子-小时 对

**e f**



是的

硅氧混合体2

1M米

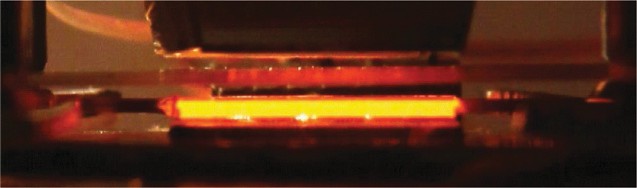


一博士 制

发射器面积， *一个*e

1 毫米

**b**



孔径

支持

腹肌/发射

光伏 电池

1 毫米

图1 | NARO-STPV的工作原理和组件。阳光通过热吸收器-发射器转化为有用的热辐射，并最终转化为电能。a，b， 我们的真空封闭装置的示意图（a）和光学图像（b）由孔径/辐射屏蔽，一组MVNT作为吸收体，一个1D PhC，一个0.55 eV带隙光伏电池（InGaAsSb[19-21）](#_bookmark7)和一个冷冻水冷却系统。c、吸收体侧光学图像

2 2

一个AR （1/4*A*e/*A*a） 1/4 10模块，在钨涂层硅衬底（1 × 1 cm）上显示空间定义的 MFNT *（A* 1/4 0.1 cm）

平面面积， 550 m

2

厚）。 d，MWNTs的扫描电镜横截面。插图：纳米管尖端的放大视图。e，一维PhC发射器的光学图像（Ae 1/4 1厘米）。f， 扫描电镜

1D PhC的横截面显示了硅和SiO2的交替层。

通过将吸收器和发射器嵌入同一导电硅衬底上，使热量通过热扩散有效地传递到发射器，从而将吸收器和发射器之间的电阻降至最低。由于吸收器面积相对于样品的平面面积减小[（图](#_bookmark0)1c），因此来自近黑体纳米管阵列表面的r-e-发射损耗面积 降低，从而提高热效率。为了减少寄生辐射损耗，我们用钨（一种相对低发射率的高温材料）和高反射率银涂层对硅衬底的侧面和纳米管吸收器周围的非活性区域进行了金属化处理。 屏蔽[（图](#_bookmark0)1a）将这种寄生辐射回收回设备。

垂直排列的碳纳米管因其在真空中的高温稳定性和近乎理想的吸收率而被选为太阳吸收体，这对于在较高的发射器与吸收器面积比下吸收高度偏心的辐照度至关重要。 如图[1d所示，](#_bookmark0)生长的纳米管在外部为10-15nm。

直径和80-100米高，变化约0.5米

尖端的高度。本研究中纳米管阵列的广谱吸收率超过0.99（补充部分"吸收剂表征"），与先前关于类似纳米管阵列几何形状的报告一致[22-24](#_bookmark10).

光子晶体的多层Si/SiO2结构，由五层硅和SiO2交替组成（[图1e，f），](#_bookmark0)改善了发射光谱之间的光谱匹配 InGaAsSb光伏电池25-27（Eg 1/4 [0.55](#_bookmark11) eV）的发射器和内部量子效率。选择这些材料是为了便于制造并与硅衬底具有高温兼容性。通过效率和功率密度[6](#_bookmark18)乘积的约束全局优化来优化层厚度。

我们的机械系统是连续的res 对准和间隙 control，同时最大限度地减少 parasitic 传导损耗（补充部分"实验设置"）。 The entire experimental layout was main-tained in vacuum （，0.5 Pa） to suppress convective and conductive heat transfer through the environment.We使用氙气-arc 灯

源模拟太阳光谱，并提供从10到75 W cm22的辐照度*范围H。*

s

为了更深入地了解我们复杂的能量转换

纳米光子面积比优化（NARO）STPV器件并将其与理论预测进行比较，我们进行了两次

0.50

*e*和l

断续器光伏

实验SQ1DD 模型

1.0

0.0

1

2 3

*升*（米米）

4 5

0.45

0.40

伊克，*和*l

0.35

0.30

*P*输出（在 厘米−2）

0.25

0.20

0.15

0.10

0.05

0.00

800 900 1，000 1，100 1，200 1，300

*T*ae （K）

图2 |TPV 表征。 InGaAsSb光伏电池产生的电输出功率密度（P输出）与1D Si/SiO2 PhC发射极温度的函数关系。 插图：测量了1D PhC在1，285 K时的[4](#_bookmark16)个光谱发射（1 *l）*和SQ1DD模型使用的光伏的内部量子效率（IQE）。 模型预测（实线）与实验点（符号）非常吻合。误差线表示 95%置信区间（请参见[方法](#_bookmark6)）。

自然纳米技术|第9卷 | 2014年2月 |[www.nature.com/naturenanotechnology](http://www.nature.com/naturenanotechnology) 127

函件

NATURE 在O技术LOGY [二：](http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nnano.2013.286) [10.1038/南O.2013.286](http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nnano.2013.286)

a 0.50

0.45

0.40

0.35

0.30

*P*输出（在 厘米−2）

0.25

0.20

0.15

0.10

0.05

*T*哎呀（K） 1,300

愿意 =1

3

5

7

10

1,200

1,100

1,000

**b**  3.5

3.0

*H*s = 48 W 厘米−2

*H*s = 20 W 厘米−2

2.5

*h*t*h*断续器 （%）

2.0

1.5

1.0

0.00

0 20 40 60 80

*高*s （宽 cm−2）

0.5

2 4 6 8 10

愿意

**c**

3.5

1,000

*T*ae （K）

1，100 1，200 1，300

**d** 4.0

*T*哎呀 = 1，285 K

*T*哎呀 = 1，055 K

愿意= 10

7

3

1

3.0 3.5

2.5 3.0

2.0

*h*t*h*断续器 （%）

1.5

1.0

2.5

*h*t*h*断续器 （%）

2.0

1.5

0.5

0.0

0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5

*P*输出 （W cm−2）

1.0

2 4 6 8 10

愿意

Figure3 | P e r f o r m a n c e c o un t r i e s a t i on o f ion of the nof the phot otic sh ev ice.a， Electracal output power d ensitity （*P*out） and absort he M i c h w h h om [Fig.](#_bookmark1)2）w it h  i n c r o l s y s t e m s （ i npu t s o f the p o w e r n a r n o r n a t i on o f the r m al i z e d b y th e a t i on o f the T h eC o you are t c on t r o l s y s t e m s t h a t t h er e s t h a t h e e e you are t c on t r o l s y s t e m s t h a t t h er e s t h a t t h e t h eC o you are t c on t r o l s y s t e m s a n d c o n t r o l s y s t e m s a n d c o n t r o l s y s t e m s /*H*s ， which is favourable for the absorber efficiency of the nanotube aray.b， Conversion t r o lsys t e ms

22

效率（聚光太阳能到电力，h t*h* tpv），面积比增加，用于fixed  *H*s 1/4 20和48 W cm

.热效率的竞争效应

TPV效率为Xed Hs带来了最佳面积比。c，转换效率作为*P*输出或等效T ae的函数（为清楚起见，省略了AR 1/4 5）。d，在给定*的P*输出或*T*ae下，转换效率随着面积比的增加而增加，这归因于热效率的提高。标记是实验点（误差线表示95%置信区间;参见[方法](#_bookmark6)）和实心波段表示SQ1DD模型，分别将*H*s视为准直或漫反射集的上限和下限。

独立实验：TPV和STPV。我们研究了光伏二极管的最大输出功率密度*（P*输出）作为TPV中吸收器-发射器温度*T*ae的函数

实验，以及STPV实验中的辐照度*H*s。 TPV表征中的温度周期测量是通过

将细规格热电偶直接粘合到基板的吸收器侧。

如shown在[图。](#_bookmark1) 2、 输出power 的 photovoltaic 细胞是高度坦佩rature依赖性，作为高能量模式（.*E*g） are e xcited with increaseng emitter temperature. 这些 experimental results are 由 a spectral支持 quasi-1D diffuse radiative

网络模型 （SQ1DD）。我们的模型假设吸收器-发射器的等温操作（即*T*a 1/4  *T*e 1/4  *T*ae），并考虑了实验测量的组分的光谱特性。和

平面STPV布局的几何结构（补充部分"建模"）。 TPV实验的结果可以验证我们的模型，并为根据测量的输出功率确定吸收器-发射器温度提供了一种间接方法。这种方法用于STPV表征*，*因为吸收器发射极温度的直接*原位*测量会增加寄生损耗并降低效率。

通过表征TPV性能，我们研究了NARO-STPV中具有递增发射器与吸收器面积比的完整能量转换过程。[图3a](#_bookmark2)显示了STPV器件的电输出功率与辐照度*H*s的函数关系

和吸收器-发射器温度（使用关系确定）

在*图*2所示的Pout和*T*ae之间）。 上部和下部

128 自然纳米技术|第9卷| 2014年2月 |[www.nature.com/naturenanotechnology](http://www.nature.com/naturenanotechnology)

NATURE NANOTECHNOLOGY [DOI：](http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nnano.2013.286) [10.1038/NNANO.2013.286](http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nnano.2013.286)

函件

我们的SQ1DD模型的估计（与治疗相关*H*s 如 20

10× 10 厘米2 NARO-STPV MWNT-1D PhC-InGaAsSb

高品质光伏电池

+ 子带隙 滤波器

准直或漫反射）绑定数据

实验 不确定性。

增加面积比的效果表现为将工作points转移到相对于增加辐照度*H*s的制度上

热再发射损耗（*sT*ae[4](#_bookmark16)）。 如果我们 考虑 吸收器 15

太阳能收集效率（热效率的主要组成部分）

ciency）， 用于黑体 表面

一个=1 −

*h*断续器

*sT*ae

*H*s

4

（1）

10

我们观察到，降低*sT*ae[4](#_bookmark16)/*H*s比会导致更高的吸收效率（s是Stefan-Boltzmann常数）。对于我们近乎黑体的纳米管吸收剂，该制度在图形上对应于图的右下角[。3a.](#_bookmark2)使用等式（1），我们估计

AR 1/4 10的吸收效率在75%以上。

然而，吸收器效率只是整个STPV效率的一个组成部分。事实上，将受限的阳光转化为电能（ht*h*tpv）的效率不会随着固定辐照度的面积比的增加而单调增加。 *H*s.如图[3b所示，](#_bookmark2)存在最佳面积比。为了理解为什么会出现这种最佳面积比，需要考虑热效率和TPV效率的竞争效应。热效率

由于吸收器效率的提高，面积比增加，ciency显着增强（如上所述）。相反，与

固定*H*s的面积比增加，吸收器-发射器的工作温度降低，因为吸收的太阳的比率

功率（~*A*a*H*s） 相对于热发射 （~*A*e*sT*ae[4](#_bookmark16)）

降低，最终导致TPV效率下降，因为

选择

4

10

*h*t*h*断续器 （%）

7

5

3

3

1 × 1 cm2 NARO-STPV

MWNT-1DPhC-InGaAsSb

2

>200

周长−2

1

愿意 =1

（参考文献）9）

和 l = 0.5， 愿意 = 1

0

20 40 60 80 100

*高*s （宽 cm−2）

图4 |效率和近期预测的相对改进

温度显著低于 Te

. 这两 者竞争

用于NARO-STPV。转换效率 *h*  *h*

作为太阳能的函数

对于固定辐照度，效应可产生最佳面积比，或者等效地，对于固定光学浓度（10倍1/4 1 W cm22，ASTM E772）。通常，最佳面积比随光学浓度的增加而增加，如图1所示[。3b，](#_bookmark2)其中最佳

从大约AR 1/4 2移动到AR 1/4 5，因为*H*s从20 W增加到48 W cm22。

利用*P*输出和*T*ae之间的关系[（图](#_bookmark1)2），我们研究了吸收器-发射器温度的系统性能。[图3c](#_bookmark2)显示效率最初急剧提高

发射极温度（低于1，200 K）时，能量高于*E*g的模式越来越兴奋。当温度接近*T*选择时，效率趋于增加的有用排放（即，

和

辐射在 *E* .*E* g）通过增加再发射损耗和与高光电流相关的光伏低效率来平衡。增加给定吸收器-发射器温度的面积比

从而提高转换效率[（图](#_bookmark2)3d）。由于TPV效率是由发射极温度决定的，因此转换效率（ht*h* tpv）的相对增加完全是不利的

选择

t t tpv

辐照度*H*s.相对于灰体吸收器-发射器对*h*t*h*tpv的贡献：MWNT-1D PhC吸收体-发射器（双重改进）和面积

比率优化（额外的双重改进）。预测效率接近20%，× 使用

高品质0.55 eV光伏组件，带子带隙反射器[20。](#_bookmark8)所有点和预测均使用SQ1DD模型进行（Hs被视为准直）。

这项工作，可以很容易地在未来的STPV设计中实现，以提高整体效率。

从 SQ1DD 型号来看，我们的最高效率工作点对应于 1，235 K 的温度，54% 的热效率和 5.8% 的 TPV 效率。 当设备在平面上扩展时

面积从1×1 cm2到10 ×10 cm2（[图](#_bookmark3)4），热效率应提高到〜75%，因为寄生损耗到非活性区域和

机械支撑从91%减少到20%的有用发射离子（补充图。5）。另一个重要方面限制了我们的

热效率的提高。在 *T*e

（1，285 K）， 我们

转换效率是光伏电池的性能

实验证明，热效率提高了两倍 。

从AR 1/4 1到AR 1/4 5。

总体而言，我们使用AR 1/4 7设备测量的最高转换效率ncy（ht*h*tpv）为3.2+0.2%，是之前STPV实验中获得的三倍[9。](#_bookmark19)

这是通过紧凑的设计在低得多的光学浓度水平（约750倍）下实现的，这使得更高的光浓度更高

光学效率。如图4所示，通过使用（1）1D PhC来改善光谱性能，实现了相对于灰体吸收器-发射器（1 1/4 0.5）的效率显着提高。发射器和垂直对齐的MWNT阵列，可实现近乎理想的太阳吸收率（对

h t*h*tpv） 和 （2） 主动发射器与吸收器面积比的优化（另外两倍改进）。在固定光学浓度下优化面积比，使用

纳米光子吸收体-发射器，实验证明

（*V*oc 1/4 0.57*E*g， 0.48 填充因子， 83% 有效面积）。使用改进但逼真的0.55 eV InGaAsSb单元（Voc 1/4 0.70*E* g，0.74填充因子，90%有效面积）和子带隙光子反射滤光子[26，](#_bookmark12)

STPV效率在中等光学强度下应接近20%（[图](#_bookmark3)4）。虽然这一结果需要放大我们的生产和实验系统，但目前具有1 cm2纳米光子吸收体发射器的STPV的实验演示验证了我们的模型。此外，通过改进低带隙光电压（如GaSb，锗和石墨烯基光伏），可以进一步提高效率。

更好的光谱控制[5，15，21](#_bookmark17)和更高的温度操作。与硅光伏电池不同，硅光伏电池已达到其约85%

热力学效率，性能最佳的低带隙（TPV）电池表现出其热力学效率的30-50%10，25，26，28。 通过重新优化一维PhC的几何形状，我们的纳米光子吸收器-发射器可以与第i个光伏配对

自然纳米技术|第9卷 | 2014年2月 |[www.nature.com/naturenanotechnology](http://www.nature.com/naturenanotechnology) 129

函件

NATURE 在O技术LOGY [二：](http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nnano.2013.286) [10.1038/南O.2013.286](http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nnano.2013.286)

带隙高达~0.7 eV。 超过这一点，温度越高

光子晶体材料，如难熔金属[18，](#_bookmark9)是必需的。这项工作中效率的提高，就像使用经过验证的模型的有希望的预测一样，表明了纳米光子STPV在高效和可扩展的太阳能转换方面的可行性。

# 方法

吸收剂和发射器采用常规的物理和化学气相沉积（PVD，CVD）工艺制备。采用低压和等离子体增强化学气相沉积法分别沉积了一维光子晶体发射极的多晶硅和SiO2层[6。](#_bookmark18)晶圆是

每次沉积后退火。在发射器的背面，在基板上溅射出10nm的钛粘附层，然后是200nm的钨层。使用激光切割的丙烯酸接触面罩，用于CNT生长的种子层通过电子束蒸发沉积到样品上。在H2/He 环境中使用高温度 CVD 工艺对碳纳米管进行grown，方法是修改

先前开发的程序[29](#_bookmark13).将样品加热至720 8C

室温在〜10分钟并保持在720 8°C下5分钟以退火铁种。

使用乙烯气体碳源在720 8C下生长CNT10分钟。所有流动气体被预热至625 8C.生长后，炉子在H2/ He环境中迅速冷却。

吸收器-发射器基板使用定制弹簧以机械方式固定

加载的针支撑布局。真空间隙为 400 mm，分离 300 mm

分别屏蔽了吸收器和光伏电池的发射器，使得孔径/吸收器和发射器/电池的视场因子超过0.85。手动线性级用于对齐和控制反射屏蔽、吸收发射极和光伏电池之间的间距。对每个吸收器-发射器对进行实验，实验的模拟太阳辐射H s的通量水平不同

通过光圈（10-75 W cm22）通过改变光之间的距离

来源和实验（补充部分"实验设置"）。*H*s被定义为通过孔径归一化的输入太阳能功率，该孔径面积或等效地，纳米管吸收器面积。*在*STPV器件的稳定工作条件下获得I–*V*和温度测量值。报告实验量的不确定性基于以下因素进行评估：

传播以下误差：方差（使用具有95%置信区间的*t*分布）、仪器误差和分辨率误差。使用冷冻水回路将光伏温度保持在293 K附近（Supplementary方程（S1））。

2013年9月17日收稿; 2013年12月2日接受;

2014年1月19日在线发布; 2015年 5 月14 日打印后更正

# 引用

1. 施韦德*等*.用于太阳能聚光器系统的光子增强热离子发射。*自然材料。*9， 762–767 （2010）.
2. 克雷默等人.具有高热浓度的高性能平板太阳能热电发电机。*自然材料。*10， 532–538 （2011）.
3. 更难，N.-P.& 吴尔菲尔热光伏太阳能转换的理论极限。*半导体。科学技术.*18， 151–156 （2003）.
4. 肖克利& Queisser， H.J.p-n结太阳能电池效率的详细平衡极限。*J. 应用 物理.*32， 510–519 （1961）.
5. Rephaeli， E. & Fan， S. 用于太阳能热光伏的吸收器和发射器

系统，以实现超过肖克利-奎瑟极限的效率。 *选择 快递*

17， 15145–15159 （2009）.

1. 陈 ， W. R. *等*.向高能量密度、高效率、 中 温芯片级热光伏发电迈进。 *国家科学院院刊 美国*

110， 5309–5314 （2013）.

1. 数据， A.， 丘布， D.L.& Veeraragavan， A.储能集成额定太阳能热光伏（SISTPV）系统的稳态分析。*Sol. Energ.*96，

33–45 （2013）.

1. 丘布L.，好，B。S.& Lowe， R.一个。具有热能储存的太阳能热光伏（STPV）系统。*AIP Conf. Proc.*358， 181–198 （1996）.
2. Datas， A. & Algora， C. 开发和实验评估

完整的 太阳能 热光伏 系统。 *程序 光伏。 回复 应用* 21，

1025–1039 （2012）.

1. 弗拉索夫S.*等*.带有太阳能钨发射器的TPV 系统。*AIP*  *Conf.过程*890， 327–334 （2007）.
2. Yugami， H.， Sai， H.， Nakamura， K.， Nakagawa， H. & Ohtsubo， H. Solar热光伏使用 Al2O3/Er3Al5O12 共晶复合选择性发射器。 *IEEE Photovolt.规格会议*28， 1214–1217 （2000）.
3. Chubb， D. L.*热光伏能量转换*基础

（爱思唯尔 ，2007年）。

1. 西格尔& 豪厄尔， J.R.*热辐射传*热（半球，1981年）。
2. 弗洛雷斯库， M.*等*.使用光子带隙材料提高太阳能电池效率。*Sol. Energ.Mat. Sol.C*  91， 1599–1610 （2007）.
3. 贝尔梅尔*等*.高效热光伏系统的设计和全局优化。*选择。Express* 18， A314–A334 （2010）.
4. Ghebrebrhan， M. *et al*.通过光子晶体共振的 Q 匹配来定制热发射。*物理修订版 A*  83， 033810 （2011）.
5. 林纳鲍尔，V。*等*.用于能量转换的高温光子晶体的最新发展。*能源环境。科学。*5， 8815–8823 （2012）.
6. 林纳鲍尔，V。*等*.多晶钽光子晶体的高温稳定性和选择性热发射。*选择。Express* 21， 11482–11491 （2013）.
7. 德佐伊萨等人.通过能量回收将宽带转换为窄带热发射。*自然光子。*6， 535–539 （2012）.
8. 切拉诺维奇，I.，约万诺维奇，N.& 卡萨基安，J.二维钨光子晶体作为选择性热发射器。*应用物理. 莱特.*92， 193101 （2008）.
9. 吴 C.*等*.基于超材料的集成等离子体吸收体/发射器，用于太阳能热光伏系统。*J. 选择。*14， 024005 （2012）.
10. 杨振平， 慈磊， 伯玉， J. A.， 林世伟.& Ajayan， P.M.对由低密度纳米管阵列制成的极暗材料的实验观察。*纳米莱特*8， 446–451 （2008）.
11. 杨振平*等*.从联锁碳纳米管阵列中对极弱光学散射的实验观察。*应用选择*50， 1850–1855 （2011）.
12. 石，H.，好吧，J。G.， 巴克， H.W.& 郭磊J.低密度碳纳米管森林作为一种指数匹配且近乎完美的吸收涂层。*应用物理。莱特。*

99， 211103 （2011）.

1. 王建华*等*.高量子效率0.5 eV GaInAsSb/GaSb热光伏器件。*应用物理。莱特。*75， 1305–1307 （1999）.
2. 达希尔*等*.四元铠砷化硅热光伏二极管。

*IEEE Trans.电子。*53， 2879–2891 （2006）.

1. 陈， W.*等*.对高效便携式发电机的低带隙热光伏二极管进行建模。*溶胶。能量。马特。溶胶。C* 94， 509–514 （2010）.
2. Posthuma， N. E.， van der Heide， J.， Flamand， G. & Poortmans， G.锗光伏妊娠器通过扩散形成和接触实现。*IEEE Trans. Electron.*54， 1210–1215 （2007）.
3. 内西姆， G. D.*等*.通过碳原料的热分解，与金属基材电接触的垂直排列的碳纳米管的低温合成。*纳米莱特*9， 3398–3405 （2009）.

# 确认

这项工作作为固态太阳能热能转换（S3TEC）中心的一部分得到支持，该中心是由美国能源部科学办公室，基础能源科学办公室资助的能源前沿研究中心，DE-FG02-09ER46577。美联社感谢马丁家庭协会，麻省理工学院能源倡议和国家科学基金会GRF的支持。是的通过韩国国家研究基金会（NRF）通过科学，ICT和未来规划部资助的基础科学研究计划（编号：2012R1A1A1014845）提供支持。作者感谢C。来自林肯实验室的Wang提供InGaAsSb细胞;H.穆塔李和C.V.汤普森集团（用于CNT增长）;嗯。米利科维奇汉普利克袋

D.普雷斯顿和设备研究实验室（用于SEM，实验设置）;和 D。克雷默，

M. Luckyanova，G. Chen和纳米工程小组（征求 建议）。

# 作者 贡献

所有作者都为这项工作做出了广泛的贡献。A.L.， D.M.B.和 Y.N.设想并实施了实验研究。美联社和 D.M.B。制造了吸收器，执行了实验并撰写了论文。W.R.C.设计和制造发射器。I.C，理学硕士E.N.W.监督和指导了该项目。

# 附加 信息

补充资料见本文件[的在线版](http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nnano.2013.286)。转载本和许可信息可在线获取 [www.nature.com/reprints](http://www.nature.com/reprints)。信件和材料请求应寄给E.N.W.

# 相互竞争的金融利益

作者声明没有竞争的经济 利益。

130 自然纳米技术|第9卷| 2014年2月 |[www.nature.com/naturenanotechnology](http://www.nature.com/naturenanotechnology)

补遗

一 种纳米光子 太阳能 热光伏 器件

# 安德烈·莱纳特， 大卫·比尔曼，南英淑，沃克R.陈、伊万·切拉诺维奇、马林·索尔雅契奇和伊芙琳·王

*自然纳米技术*9，126-130（2014）; 2014年1月19日在线发布;2015年 5 月14 日打印后更正。

在 这 信 这 方程 描述 *T*选择 （请参阅 以下; 和 也 方程 1.133 在 裁判。 1) 代表 这 温度 必填 为 这 最大值普朗克以波长单位表示的分布火柴带隙能源。然而能量在哪 这 最大 发生 取决于 上 是否 我们 考虑 能源 流 为 单位 频率 范围 或 为 单位 波长 范围2,3. A 更多 appro- 普里特 近似值 比赛 这 最大 之 普朗克 分配 表示 在 单位 之 频率 或 能源 自 这 隙 能源 这 缩放 因素 在 这 箱 是 4114 K 家–1.

和

*T*选项 −1

e ≈ 2336 [K eV

] · *断*续器

然而，从这封信中提出的实验结果中可以明显看出，在温度下，0.55 eV电池的峰值太阳热光伏（STPV）效率基本达到。低于校正后的比例因子所建议的。因此，带隙能量与对应于最大发射的能量之间的匹配并不能完全确定发射器的最佳温度，特别是不能在STPV的情况下;这种简单近似未考虑的因素，例如电池中的热化损耗，起着重要作用。有关实际STPV转换器最佳温度的更完整讨论，请参阅参考。4.

作者想承认H.加州大学圣巴巴拉分校的克罗默（Kroemer）将这个比例因子问题引起我们的注意。

# 引用

1.安达L.*热光伏能量转换*基础（2007）.2. 索弗，B。H.和林奇，D。K.*是。J.物理。***67，** 946–953 （1999）.

1. Kittel， C. & Kroemer， H.*热物理* （W.H·弗里曼，1980年）。
2. Lenert， A.， Nam， Y.， Bierman， D.M. & Wang， E. N.*Opt. Express*  **22，**  A1604 （2014）.