



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 111987180 A

(43) 申请公布日 2020. 11. 24

(21) 申请号 202010867042.0

H01L 31/054 (2014.01)

(22) 申请日 2020.08.26

(71) 申请人 浙江浙能技术研究院有限公司

地址 311121 浙江省杭州市余杭区五常街
道余杭塘路2159-1号1幢5楼

申请人 上海交通大学

(72) 发明人 寿春晖 杜长庆 金胜利 彭浩

韩杉杉 贺海晏 黄绵吉 丁莞尔

邬荣敏 周剑武

(74) 专利代理机构 杭州九洲专利事务所有限公

司 33101

代理人 张羽振

(51) Int. Cl.

H01L 31/055 (2014.01)

H01L 31/048 (2014.01)

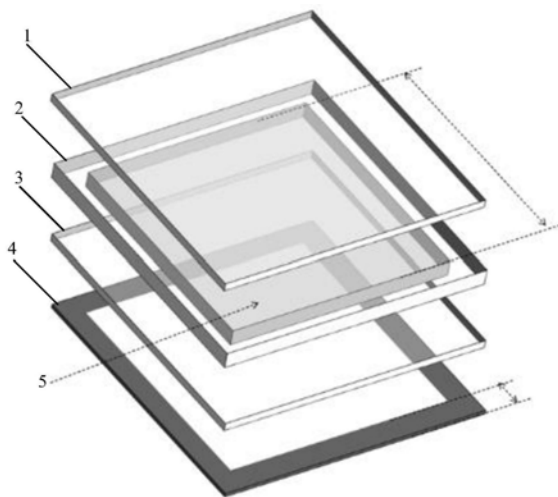
权利要求书1页 说明书9页 附图7页

(54) 发明名称

基于胶体硅量子点纳米粒子选择性吸收紫外线的太阳能发电窗

(57) 摘要

本发明涉及一种基于胶体硅量子点纳米粒子选择性吸收紫外线的太阳能发电窗,包括: SiQDNPs-LSC(硅量子点纳米粒子太阳能集中器)、发电窗和反射镜;所述发电窗内设有硅基光伏电池带(Si PV条),硅基光伏电池带的上表面粘附SiQDNPs-LSC的下表面。本发明的有益效果是:在模拟阳光下,由于SiQDNPs主要仅吸收紫外线,因此传播的红色荧光几乎不被重新吸收,同时穿过窗玻璃的日光保留了极高的AVT和CRI; SiQDNPs-LSC可产生较高的功率转换效率,其中SiQDNPs荧光贡献占很大比例,同时SiQDNPs-LSC保留了较高的光谱质量,有利于窗户应用。



1. 基于胶体硅量子点纳米粒子选择性吸收紫外线的太阳能发电窗,其特征在於,包括: SiQDNPs-LSC、发电窗和反射镜;所述发电窗内设有硅基光伏电池带(4),硅基光伏电池带(4)的上表面粘附SiQDNPs-LSC的下表面, SiQDNPs-LSC外围四边通过环氧树脂(6)连接反射镜(7);

所述SiQDNPs-LSC包括前玻璃板(1)、PMMA环(2)、后玻璃板(3)和液态SiQDNPs悬浮液薄层(5);前玻璃板(1)下表面贴合PMMA环(2)上表面,后玻璃板(3)上表面贴合PMMA环(2)下表面,前玻璃板(1)、PMMA环(2)和后玻璃板(3)之间形成空隙结构;液态SiQDNPs悬浮液薄层(5)为充满在1-十八烯中的SiQDNPs悬浮液(8)的空隙结构;后玻璃板(3)为SiQDNPs-LSC的下表面。

2. 根据权利要求1所述基于胶体硅量子点纳米粒子选择性吸收紫外线的太阳能发电窗,其特征在於:所述反射镜(7)在SiQDNPs-LSC水平方向的倾角为 45° 。

3. 根据权利要求1所述基于胶体硅量子点纳米粒子选择性吸收紫外线的太阳能发电窗,其特征在於:所述反射镜(7)在SiQDNPs-LSC水平方向的倾角为 0° 。

4. 根据权利要求1所述基于胶体硅量子点纳米粒子选择性吸收紫外线的太阳能发电窗,其特征在於:所述前玻璃板(1)的厚度为 $0.1\text{mm}\sim 100\text{mm}$ 。

5. 根据权利要求1所述基于胶体硅量子点纳米粒子选择性吸收紫外线的太阳能发电窗,其特征在於:所述PMMA环(2)的厚度为 $0.1\text{mm}\sim 100\text{mm}$ 。

6. 根据权利要求1所述基于胶体硅量子点纳米粒子选择性吸收紫外线的太阳能发电窗,其特征在於:所述硅基光伏电池带(4)的宽度为 $1\text{cm}\sim 10\text{cm}$ 。

基于胶体硅量子点纳米粒子选择性吸收紫外线的太阳能发电窗

技术领域

[0001] 本发明属于集成光伏建筑 (BIPV) 技术领域,尤其涉及一种基于胶体硅量子点纳米粒子选择性吸收紫外线的太阳能发电窗。

背景技术

[0002] 太阳能发电窗将普通的天窗或立面窗户变成小型发电机,以扩展电网,在集成光伏建筑 (BIPV) 中起着不可或缺的作用。BIPV是一种新兴的可再生能源技术,可以用光伏组件替换或翻新传统的建筑组件。特别是对于那些高度城市化地区的高层建筑,安装地面或屋顶太阳能电池板的空间远远不足以补偿建筑物本身的能耗。因此,为了实现许多国家积极追求的近零能耗建筑的最终目标,利用高层建筑巨大的窗口区域进行能量收集是一种有效的方法。

[0003] 太阳能发电窗虽然效率不如传统太阳能电池板,但当连接到大型用电网络时,依然能产生足够的电量。同时太阳能发电窗必须满足一定的安全要求并保持半透明,以使建筑居民可以享受自然光。理想情况下,太阳能发电窗将仅吸收和收集太阳光谱中的紫外线 (UV) 和近红外 (NIR) 部分,透过可见光部分 (类似于窗户上的低辐射涂层) 改变入射光谱以提高建筑物的能效。

[0004] 几种透明的光伏技术已经出现在太阳能发电窗应用中,其中一些已经被公司商业化 (例如Onyx Solar,Ubiquitous Energy,SolarWindow Technologies和UbiQD),并已安装在全球著名的建筑物上。其中空间分段或中间色的硅薄膜技术在太阳能发电窗市场上获得了最大的关注。此外,基于有机物和有机无机混合材料 (例如钙钛矿) 的半透明薄膜 (基于染料的和染料敏化的光伏电池) 最近备受关注,但在实现广泛部署之前必须提高半透明薄膜的长期稳定性。这些薄膜器件虽然能够实现高达14%的高功率转换效率 (PCE),但对包括可见光范围在内的太阳光谱具有广泛的吸收能力,从而导致平均可见光透射率 (AVT) 相对较低。

[0005] 另一方面,UV和/或NIR波长具有选择性吸收的可见透明的发光太阳能集中器 (LSC) 可以轻松实现高于50%的AVT,这对于可见光透射率的应用是一个至关重要的特性。此外,具有简单结构的LSC (通常是涂覆或嵌入有荧光团的波导塑料或玻璃平板) 可以无缝替换或翻新现有的窗户,同时也不会降低其原有的美学品质。在日光下,荧光团发出荧光,然后由LSC引导,通过全反射导向边缘,在边缘处,常规光伏电池将荧光转换为电能。LSC侧壁面积比光伏电池要小得多。在前表面,由光伏电池接收的荧光光子通量被集中,光伏材料成本降低。

[0006] 从两个重要方面评估LSC性能,即转换效率 (例如PCE和光学效率) 和光谱质量 (例如AVT和显色指数CRI),这两者通常是相互成反比的。为了在不牺牲光谱质量的情况下实现高转换效率,LSC中使用的荧光团不仅需要具有高的光致发光量子效率 (PLQY),而且还必须在可见光之外能够选择性吸收和拥有较大的斯托克斯位移,以减轻重吸收效应,这通常是

荧光在LSC上传导的主要损耗。对于具有100%AVT的单结,对UV和NIR选择性的LSC,PCE的热力学极限可以高达21%。最近,已经探索了具有上述光学特性的各种荧光团,以实现用于太阳能发电窗口应用的有效且可见的LSC,包括有机染料,磷光纳米晶体,可持续性的天然有机分子,碳纳米点,钙钛矿量子点和其他无重金属量子点。

[0007] 综上所述,提出一种基于胶体硅量子点纳米粒子选择性吸收紫外线的太阳能发电窗。

发明内容

[0008] 本发明的目的是克服现有技术中的不足,提供一种基于胶体硅量子点纳米粒子选择性吸收紫外线的太阳能发电窗。

[0009] 这种基于胶体硅量子点纳米粒子选择性吸收紫外线的太阳能发电窗,包括:SiQDNPs-LSC(硅量子点纳米粒子太阳能集中器)、发电窗和反射镜;所述发电窗内设有硅基光伏电池带(Si PV条),硅基光伏电池带的上表面粘附SiQDNPs-LSC的下表面,SiQDNPs-LSC外围四边通过环氧树脂连接反射镜;

[0010] 所述SiQDNPs-LSC包括前玻璃板、PMMA环、后玻璃板和液态SiQDNPs悬浮液薄层(窗玻璃);前玻璃板下表面贴合PMMA环上表面,后玻璃板上表面贴合PMMA环下表面,前玻璃板、PMMA环和后玻璃板之间形成空隙结构;液态SiQDNPs悬浮液薄层为充满在1-十八烯中的SiQDNPs悬浮液的空隙结构;后玻璃板为SiQDNPs-LSC的下表面。

[0011] 作为优选,所述反射镜在SiQDNPs-LSC水平方向的倾角为45°。

[0012] 作为优选,所述反射镜在SiQDNPs-LSC水平方向的倾角为0°。

[0013] 作为优选,所述前玻璃板的厚度为0.1mm~100mm。

[0014] 作为优选,所述PMMA环的厚度为0.1mm~100mm。

[0015] 作为优选,所述硅基光伏电池带的宽度为1cm~10cm。

[0016] 本发明的有益效果是:

[0017] (1) 本发明设计了使用胶体硅量子点纳米粒子(SiQDNPs)作为发光太阳能集中器(LSC)的荧光物质,硅基光伏电池带前置耦合的太阳能发电窗;发光太阳能集中器(LSC)由夹在两个薄玻璃板之间的液态SiQDNPs悬浮液薄层组成,而发电窗是将硅基光伏电池带前表面粘附到LSC后表面上制作而成;为了防止荧光从边缘泄漏出来,LSC的外围四边贴上反射镜;

[0018] (2) 分散在1-十八碳烯中的SiQDNPs能够选择性吸收太阳光谱的紫外线部分,并以高量子效率将其转换为红色荧光;通过LSC固有的波导结构和围绕LSC边缘的反射镜,SiQDNPs产生的荧光最终被定向传导到前向的硅基太阳能电池带,从而增强了整体的PCE;由于SiQDNPs吸收光谱和光致发光光谱之间的重叠可忽略不计,其因重吸收的损失不明显;前置的外围硅光伏带不仅可以收集SiQDNPs产生的红色荧光来发电,而且还可以通过前向设计获得直射的太阳辐射来发电;

[0019] (3) 在模拟阳光下,此外由于SiQDNPs主要仅吸收紫外线,因此传播的红色荧光几乎不被重新吸收,同时,穿过窗玻璃的日光保留了极高的AVT和CRI;SiQDNPs-LSC可产生较高的功率转换效率,其中SiQDNPs荧光贡献占很大比例,同时SiQDNPs-LSC保留了较高的光谱质量,有利于窗户应用。

附图说明

- [0020] 图1为SiQDNPs-LSC的3D放大图(未显示反射镜);
- [0021] 图2为SiQDNPs-LSC边缘的横截面图;
- [0022] 图3为SiQDNPs-LSC的后视图;
- [0023] 图4在紫外线照射下反射镜分别倾斜 45° 和倾斜 0° 时不同尺寸SiQDNPs-LSC的PCE增益图;
- [0024] 图5(A)为实验装置示意图,图5(B)为两个狭缝位置的测量PL光谱图;
- [0025] 图6(A)和图6(B)为反射镜分别倾斜 45° 和倾斜 0° 的SiQDNPs-LSC($W_{LSC}=10\text{cm}$)的PCE增益随照明波长(365nm、465nm、525nm和625nm)变化的趋势图;图6(C)与图6(D)为反射镜分别倾斜 45° 和倾斜 0° 的SiQDNPs-LSC($W_{LSC}=10\text{cm}$)的整体PCE与照明波长的曲线图;
- [0026] 图7(A)为在模拟阳光下SiQDNPs-LSC的PCE增益与SiQDNPs浓度的关系图;图7(B)为与(A)对应的总体PCE与窗玻璃的AVT或整体AVT图;图7(C)为 $2.7\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的SiQDNPs-LSC($W_{LSC}=10\text{cm}$)在室外环境中状态图;图7(D)为不同SiQDNPs浓度的SiQDNPs-LSC的CRI和CCT图;
- [0027] 图8(A)为SiQDNPs-LSC安装示意图;图8(B)为反射镜倾斜 45° (上排)和倾斜 0° (下排)的不同尺寸的SiQDNPs-LSC的照片
- [0028] 图9(A)为有和没有SiQDNPs的情况下, SiQDNPs-LSC窗玻璃的透射光谱图;图9(B)为SiQDNPs-LSC发电窗处的透射光谱图;图9(C)为5mm玻璃/2mm的1-十八碳烯/5mm玻璃的透射光谱图。
- [0029] 图10为SiQDNPs-LSC的窗玻璃区域的临界光锥分析光路图;
- [0030] 图11(A)为穿过SiQDNPs-LSC的窗玻璃区域的透射光谱图,图11(B)为AM 1.5G光子通量曲线图;图11(C)为AM 1.5G光谱辐照度图。
- [0031] 附图标记说明:前玻璃板1、PMMA环2、后玻璃板3、硅基光伏电池带4、液态SiQDNPs悬浮液薄层5、环氧树脂6、反射镜7、在1-十八烯中的SiQDNPs悬浮液8、纤维9、光电倍增管10、黑色板纸11。

具体实施方式

[0032] 下面结合实施例对本发明做进一步描述。下述实施例的说明只是用于帮助理解本发明。应当指出,对于本技术领域的普通人员来说,在不脱离本发明原理的前提下,还可以对本发明进行若干修饰,这些改进和修饰也落入本发明权利要求的保护范围内。

[0033] 实施例1:

[0034] 如图1所示,基于胶体硅量子点纳米粒子选择性吸收紫外线的太阳能发电窗包括: SiQDNPs-LSC、发电窗和反射; SiQDNPs-LSC包括一个前玻璃板1(厚度为1毫米),一个PMMA环2(厚度为2毫米)和一个后玻璃板3(厚度为1毫米);由两个玻璃板(前玻璃板1及后玻璃板3)和PMMA环2形成的空隙结构充满了SiQDNPs悬浮液;包含SiQDNPs悬浮液的中心正方形区域(面积= $W_{LSC}\times W_{LSC}$)被定义为液态SiQDNPs悬浮液薄层5,而粘附到SiQDNPs-LSC背面的硅光伏条(Si PV条)(宽度=1cm)形成发电窗;

[0035] 如图2所示, SiQDNPs-LSC边缘设有底部向上倾斜 45° 的反射镜7或 0° (不倾斜)的反射镜7,底部向上倾斜 45° 的反射镜7通过环氧树脂6与前玻璃板1、PMMA环2和后玻璃板3相

连;在365nm紫外线照射下,反射镜7倾斜45°的SiQDNPs-LSC显示出更多的红色荧光沿发电窗反射,而反射镜7倾斜0°的SiQDNPs-LSC显示出更多的红色荧光从窗玻璃逸出。

[0036] 在光照下,前置硅基太阳能电池(Si PV)可以通过收集入射在发电窗上的光来发电。同时,窗玻璃内的硅量子点产生的荧光也可以传播到硅基光伏电池带4,并提高其效率。效率的增强可以通过PCE增益来量化,PCE增益定义为用装在液态SiQDNPs悬浮液薄层5中的SiQDNPs悬浮液测得的硅基光伏电池带4的PCE除以用窗玻璃中的纯1-十八烯测得的PCE。为了避免布线的复杂性,对于每个SiQDNPs-LSC,我们仅沿一个SiQDNPs-LSC边缘放置一个从常规单晶硅太阳能电池晶片(PCE=20.8%)切成小块的硅基光伏电池带4。计算总PCE的总光吸收面积等于 $(W_{LSC}+2cm) \times (W_{LSC}+2cm)$,并且所产生的总电能等于一个硅基光伏电池带4带所产生的总电能乘以四。

[0037] 实施例2:

[0038] 为了了解窗玻璃尺寸如何影响增强效果,研究在365nm紫外线照射下不同 W_{LSC} 尺寸下的PCE增益(图4和表1)。图4中紫外线强度等于 $0.97mW \cdot cm^{-2}$,波长为365nm,SiQDNPs悬浮液的浓度约为 $0.7mg \cdot mL^{-1}$ 。下表1为在365nm紫外线照明下的不同尺寸的SiQDNPs-LSC($W_{LSC}=2cm, 4cm, 6cm, 8cm$ 和 $10cm$)的短路电流(I_{sc}),开路电压(V_{oc}),填充系数(FF)和最大功率的值。

[0039] 表1紫外线照明下的不同尺寸的SiQDNPs-LSC参数值表

With SiQDNP								
W_{LSC} (cm)	Mirror Tilted 45°				Mirror Tilted 0°			
	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	FF	Max Power (W)	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	FF	Max Power (W)
10	1.43E-03 $\pm 1.09E-04$	0.287 ± 0.006	0.452 ± 0.008	1.86E-04 $\pm 2.04E-05$	1.90E-03 $\pm 1.10E-04$	0.337 ± 0.006	0.476 ± 0.003	3.05E-04 $\pm 2.23E-05$
8	8.32E-04 $\pm 7.50E-05$	0.263 ± 0.006	0.420 ± 0.015	9.20E-05 $\pm 1.32E-05$	1.15E-03 $\pm 1.02E-04$	0.307 ± 0.006	0.450 ± 0.008	1.59E-04 $\pm 1.96E-05$
6	6.50E-04 $\pm 4.77E-05$	0.213 ± 0.006	0.369 ± 0.007	5.13E-05 $\pm 6.27E-06$	7.36E-04 $\pm 5.53E-05$	0.257 ± 0.012	0.389 ± 0.004	7.37E-05 $\pm 9.79E-06$
4	3.70E-04 $\pm 3.78E-05$	0.193 ± 0.006	0.337 ± 0.008	2.42E-05 $\pm 3.72E-06$	4.82E-04 $\pm 4.96E-05$	0.227 ± 0.012	0.365 ± 0.003	4.00E-05 $\pm 6.59E-06$
2	2.30E-04 $\pm 1.43E-05$	0.113 ± 0.006	0.300 ± 0.001	7.80E-06 $\pm 8.60E-07$	2.70E-04 $\pm 2.37E-05$	0.127 ± 0.006	0.289 ± 0.009	9.93E-06 $\pm 1.59E-06$
Without SiQDNP								
W_{LSC} (cm)	Mirror Tilted 45°				Mirror Tilted 0°			
	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	FF	Max Power (W)	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	FF	Max Power (W)
10	8.49E-04 $\pm 5.99E-05$	0.243 ± 0.006	0.401 ± 0.007	8.31E-05 $\pm 9.36E-06$	1.57E-03 $\pm 9.77E-05$	0.323 ± 0.006	0.470 ± 0.004	2.39E-04 $\pm 1.89E-05$
8	6.16E-04 $\pm 7.28E-05$	0.240 ± 0.010	0.387 ± 0.008	5.76E-05 $\pm 1.05E-05$	1.02E-03 $\pm 8.92E-05$	0.297 ± 0.012	0.442 ± 0.009	1.34E-04 $\pm 1.85E-05$
6	5.38E-04 $\pm 4.21E-05$	0.197 ± 0.012	0.355 ± 0.003	3.77E-05 $\pm 5.22E-06$	7.01E-04 $\pm 5.54E-05$	0.250 ± 0.000	0.382 ± 0.011	6.71E-05 $\pm 7.32E-06$
4	3.29E-04 $\pm 2.91E-05$	0.180 ± 0.000	0.334 ± 0.01	1.98E-05 $\pm 2.38E-06$	4.60E-04 $\pm 3.20E-05$	0.223 ± 0.006	0.361 ± 0.011	3.72E-05 $\pm 4.49E-06$
2	2.26E-04 $\pm 1.75E-05$	0.110 ± 0.010	0.296 ± 0.007	7.38E-06 $\pm 1.14E-06$	2.70E-04 $\pm 3.39E-05$	0.123 ± 0.012	0.291 ± 0.004	9.77E-06 $\pm 2.12E-06$

[0041] 由于入射在SiQDNPs-LSC表面上的光强度是恒定的($0.97mW \cdot cm^{-2}$),因此装载在窗玻璃中的SiQDNPs悬浮液(约 $0.7mg \cdot mL^{-1}$)获得的最大功率与在窗玻璃中(即没有SiQDNPs时)使用纯的1-十八烯的比值所获得的结果对应于图4中所示的PCE增益。反射镜分别倾斜45°

和分别倾斜 0° 时突出显示的 I_{SC} 之间的差即为 ΔI_{SC} ,用来计算 $W_{LSC}=10\text{cm}$ 且反射镜倾斜 45° 的SiQDNPs-LSC的 η_{opt} 。两组 I_{SC} 之间的差值即为 ΔI_{SC} ,用于计算 $W_{LSC}=10\text{cm}$ 和反射镜倾斜 0° 的SiQDNPs-LSC的 η_{opt} 。

[0042] 图9(A)中#1号曲线表示经过1mm玻璃/2mm的1-十八烯/1mm玻璃的光路;#2号曲线表示经过1mm玻璃/2mmSiQDNPs悬浮液(约 $0.7\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$)/1mm玻璃的光路;#3号曲线为#1号曲线减去#2号曲线,代表分散在1-十八烯中的SiQDNPs的吸收;在365nm处,吸收为50%;图9(B)中曲线代表1mm玻璃/2mm PMMA/1mm玻璃的光路,与图9(A)中#1号曲线几乎相同。图10中光路(A)表示临界光锥损耗,而光路(C)表示全内反射;光路(B)展示出了荧光光束在玻璃-空气界面处的入射角等于 θ_c (临界角)并且在1-十八碳烯-玻璃界面处的入射角等于 θ_1 时的情况;此时,根据斯涅尔定律, $1.44 \times \sin\theta_1 = 1.46 \times \sin\theta_c = 1 \times \sin 90^\circ = 1$;因此窗玻璃内可以通过全内反射传播到LSC边缘的荧光光子的百分比,即 η_{opt} 的最大理论值等于 $(1 - 1/1.44^2)^{1/2} = 72\%$ 。

[0043] 在实验过程中,对于每种 W_{LSC} 尺寸,使用相同的SiQDNPs-LSC但在窗玻璃中具有不同的含量来测量带有和不带有SiQDNPs的PCE。通常,较大的光吸收面积导致窗玻璃内部产生更多的荧光,因此提高了硅基光伏电池带4的PCE。特别是,在 $W_{LSC}=10\text{cm}$ 的情况下,反射镜分别倾斜 45° 和 0° 时,PCE增益可高达2.24和1.28。但是,当 W_{LSC} 下降到2cm以下时,PCE接近统一。此外,光学效率(η_{opt}),在这里定义为窗玻璃内部产生的能够传播到Si PV并被Si PV接收的荧光光子的百分比,可以使用以下公式计算: $4 \times \Delta I_{SC} / q = I_{light} \times W_{LSC}^2 \times A_{SiQDNP} / h\nu_{365\text{nm}} \times \theta_{PL} \times \eta_{opt} \times \theta_{PV}$,其中 ΔI_{SC} 表示在有和没有SiQDNPs的情况下测量的一个硅光伏带的短路电流差(表1), I_{light} 是365nm入射光强度($=0.97\text{mW cm}^{-2}$), $A_{SiQDNPs}$ 是在365nm处SiQDNPs层的吸收率($=50\%$,图9(A)), $h\nu_{365\text{nm}}$ 是365nm的光子能量($=5.44 \times 10^{-19}\text{J}$), θ_{PL} 是SiQDNPs层在365nm处的PLQY(约0.35)和 θ_{PV} 在650nm(约0.95)处Si PV的量子效率。

[0044] 对于 $W_{LSC}=10\text{cm}$ 且反射镜倾斜 45° 的SiQDNPs-LSC, η_{opt} 估计为49%,而由斯涅尔定律定义的 η_{opt} 的最大理论值为72%。换句话说,除了28%的逃逸锥损失外,约32%的传播荧光光子在通过全内反射传播通过波导时被损失,最终被Si PV吸收。丢失传播的荧光光子的原因可能包括:(1) SiQDNPs的重新吸收,(2) 玻璃平板的吸收,(3) 由于不完善的波导结构引起的散射和(4) 反射镜的非理想反射率。为了进行比较,对于具有相同 W_{LSC} 尺寸($=10\text{厘米}$)但反射镜倾斜 0° 的SiQDNPs-LSC, η_{opt} 估计为28%,这远低于使用 W_{LSC} 获得的 η_{opt} ($=49\%$)。反射镜倾斜了 45° ,这是因为大多数垂直于边缘传播的荧光光子会被垂直反射镜反射回波导中,从而导致上述损耗机制被耗尽的可能性更高。如图3所示,从窗玻璃逸出的较强的红色荧光是一种表现。

[0045] 为了找出荧光光子在窗玻璃区域中传播时损失的关键因素,我们对当只有一条窗玻璃的缝隙暴露于365nm紫外线照射时,从SiQDNPs-LSC边缘收集到的荧光(PL)进行了表征(图5),SiQDNPs-LSC(无反射镜),只有窗玻璃的一条缝隙暴露于365nm紫外线的装置。图5(A)展示了在两种不同的狭缝位置处,用于测量SiQDNPs-LSC边缘荧光光谱的光学设置,图5(A)中,#1装置和#2装置均采用纤维9和光电倍增管10,纤维9连接分光器,分光器连接光电倍增管10;图5(B)中显示:与狭缝配置#1曲线相比,用狭缝配置#1曲线测量的PL光谱显示PL

峰发生了6nm的蓝移,积分面积减小了约30%。其中入射到SiQDNPs-LSC表面的365nm紫外光强度为 $4\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$,SiQDNPs浓度约为 $0.7\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。PL光谱是使用多模石英光纤(数值孔径=0.22)获得的,其一端固定在SiQDNPs-LSC边缘上,另一端连接到由单色仪和光电倍增管(PMT)组成的荧光分光光度计上。多模石英光纤和SiQDNPs-LSC边缘之间的相对位置始终保持恒定,并且两部分之间的小间隙填充有浸入式透镜油(折射率=1.52),以促进荧光进入光纤。在狭缝距离硅基光伏电池带9厘米处(图5中的#2装置),相比于狭缝紧挨着硅基光伏电池带(图5中#1装置)获得的光谱,荧光光谱显示PL峰出现了6nm蓝移。这种蓝移应归因于钠钙玻璃的吸收,该钠钙玻璃在红色光谱范围内具有更强的吸收(图9(C))。尽管前后玻璃平板都很薄(1毫米),但考虑到红色荧光光束到达LSC边缘可能需要多次全内反射的事实,光束穿过玻璃的累积厚度可能会很大。与大多数其他LSC不同,此处由于荧光团引起的重吸收相对于玻璃吸收而言不太明显,因为基于吸收光谱,SiQDNPs重吸收应导致PL红移而不是蓝移。(图5(B))此外,由于SiQDNPs悬浮液的吸光度和PL光谱之间的重叠可忽略不计,并且在大于500nm的波长处具有较小的摩尔消光系数,所以荧光重吸收效果无关紧要。最后,狭缝#2测得的PL光谱的积分面积比狭缝#1测得的积分光谱小30%,这表明大约30%的荧光光子在9cm的距离内传播时会丢失。窗玻璃。实际上,在 $10\text{cm}\times 10\text{cm}$ 的窗玻璃中,荧光光子的平均传播距离应小于9cm。考虑到LSC边缘的其他潜在损耗,此处的窗玻璃损耗分析与先前估计的光学效率一致($\eta_{\text{opt}}=49\%$,即,约32%的传播荧光光子在被Si PV接收之前被丢失) $W_{\text{LSC}}=10\text{cm}$ 且反射镜倾斜 45° 的SiQDNPs-LSC。

[0046] 接下来,在365、465、525和625nm单波长照明下表征了SiQDNPs-LSC($W_{\text{LSC}}=10\text{cm}$)的PCE增益和整体PCE(表2)。图6(A)与图6(B)中单波长光源使用的是365nm,465nm,525nm和625nm的大功率发光二极管,其入射在SiQDNPs-LSC表面上的光强度分别等于 $0.97\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、 $0.93\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、 $1.00\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 $0.84\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。其中SiQDNPs浓度约为 $0.7\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。图中曲线代表窗玻璃中SiQDNPs的吸收。图6(C)与图6(D)中照明波长包括365nm,465nm,525nm和625nm,图6(C)和图6(D)中位于上方的曲线代表填充SiQDNPs的LSC测量的总体PCE,位于下方的曲线代表未填充SiQDNPs的LSC测量的总体PCE。下表2为在365nm、465nm、525nm和625nm单波长光源照射下的SiQDNPs-LSC($W_{\text{LSC}}=10\text{cm}$)的短路电流(I_{sc}),开路电压(V_{oc}),填充系数(FF)和PCE的值;这里的单波长光源是由365nm、465nm、525nm和625nm大功率发光二极管产生,入射在SiQDNPs-LSC表面上的光强度分别等于 $0.97\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、 $0.93\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、 $1.00\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 $0.84\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。SiQDNPs浓度约为 $0.7\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。计算总PCE时使用总光吸收面积等于 $12\text{cm}\times 12\text{cm}$,并且所产生的总电能等于表中所示的一条硅光伏带所产生的总电能乘以四。

[0047] 表2不同波长光源照射下的SiQDNPs-LSC的参数值表

With SiQDNP								
Wavelength (nm)	Mirror Tilted 45°				Mirror Tilted 0°			
	I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	FF	Overall PCE (%)	I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	FF	Overall PCE (%)
365	1.43E-03 ±1.09E-04	0.287 ±0.006	0.452 ±0.008	0.531 ±0.058	1.90E-03 ±1.10E-04	0.337 ±0.006	0.476 ±0.003	0.870 ±0.064
465	2.55E-03 ±1.83E-04	0.357 ±0.006	0.475 ±0.005	1.300 ±0.126	3.31E-03 ±1.78E-04	0.377 ±0.006	0.511 ±0.002	1.910 ±0.131
525	2.84E-03 ±1.25E-04	0.357 ±0.006	0.477 ±0.005	1.340 ±0.074	3.65E-03 ±1.56E-04	0.383 ±0.006	0.509 ±0.004	1.980 ±0.097
625	1.98E-03 ±1.64E-04	0.330 ±0.000	0.452 ±0.014	0.976 ±0.112	2.66E-03 ±5.60E-05	0.337 ±0.006	0.541 ±0.006	1.600 ±0.043

[0048]

Without SiQDNP								
Wavelength (nm)	Mirror Tilted 45°				Mirror Tilted 0°			
	I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	FF	Overall PCE (%)	I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	FF	Overall PCE (%)
365	8.49E-04 ±5.99E-05	0.243 ±0.006	0.401 ±0.007	0.237 ±0.027	1.57E-03 ±9.77E-05	0.323 ±0.006	0.470 ±0.004	0.682 ±0.054
465	2.33E-03 ±1.76E-04	0.347 ±0.006	0.468 ±0.011	1.140 ±0.127	2.99E-03 ±1.00E-04	0.370 ±0.000	0.508 ±0.002	1.680 ±0.061
525	2.79E-03 ±7.87E-05	0.357 ±0.006	0.474 ±0.003	1.310 ±0.039	3.61E-03 ±3.07E-05	0.383 ±0.006	0.510 ±0.003	1.950 ±0.021
625	2.05E-03 ±1.30E-04	0.330 ±0.000	0.451 ±0.013	1.010 ±0.094	2.72E-03 ±8.69E-05	0.323 ±0.006	0.570 ±0.005	1.650 ±0.069

[0049] 通常,反射镜倾斜45°的SiQDNPs-LSC与倾斜0°的反射镜相比,由于具有更高的光学效率($\eta_{opt}=49\%$ 对28%),因此显示出更高的PCE增益,但是总体相对较低的PCE,因为Si PV被倾斜45°的反射镜部分遮挡(图2)。此外,PCE增益的趋势几乎与SiQDNPs吸收的趋势一致(图1,图2和图9中的#3曲线),表明该增益应归因于SiQDNPs产生的荧光。在365nm照明下,反射镜分别倾斜45°和0°的SiQDNPs-LSC分别具有2.24和1.28的高PCE增益。但是,由于SiQDNPs在>500nm波长处的吸收可以忽略不计,因此在绿色和红色光谱范围内的PCE增益值是近乎相等,趋于一致的。另一方面,在窗玻璃中未添加SiQDNPs的LSC的整体PCE趋势(分别在图6(C)和6(D)中位于下方的曲线)与通过硅基光伏电池带区域的透射光谱相关(图9(B))。在365和465nm照明下,由于荧光增强,在窗玻璃中使用SiQDNPs测量的总体PCE(分别在图6(C)和6(D)中位于上方的曲线)要高于未使用SiQDNPs测量的PCE。在525nm照明下,对于带有反射镜分别倾斜45°和0°的SiQDNPs-LSC,PCE增益微不足道,且整体PCE分别达到的最大值为1.3%和2%。而其总体的PCE在625nm处降低,这可能是由于在红色光谱范围内钠钙玻璃平板的吸收更强。

[0050] 除了波长分辨分析之外,我们还对不同SiQDNPs悬浮液的浓度(图7(A)和图7(B)和表3)的SiQDNPs-LSC($W_{LSC}=10\text{cm}$)在模拟阳光下的PCE增益和整体PCE进行了表征。图7(A)中 $W_{LSC}=10\text{cm}$,SiQDNPs浓度取 $0.9\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $1.8\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $2.7\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 和 $3.6\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 这四个值;模拟阳光是由传统的氙气灯产生的,其入射到SiQDNPs-LSC表面的光强度为 $6.51\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。图7(B)中,对于图7(A)情况下的SiQDNPs-LSC,计算出其总体PCE与窗玻璃的AVT或整体AVT(=窗玻璃AVT) $\times 10^2/12^2$),对于每个数据点,都标记了相应的SiQDNPs浓度。下表3为在模拟阳光下不同SiQDNPs浓度的SiQDNPs-LSC($W_{LSC}=10\text{cm}$)的短路电流(I_{sc}),开路电压(V_{oc}),填充系数(FF)和PCE的值。在此,模拟阳光是由传统的氙气灯产生的,入射到SiQDNPs-LSC表面的光强度为 $6.51\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。注意,计算总PCE时要使用总光吸收面积等于 $12\text{cm}\times 12\text{cm}$,并且所产生的总功率等于表中所示的一条硅光伏带所产生的总功率乘以四。

[0051] 表3模拟阳光下不同SiQDNPs浓度的SiQDNPs-LSC的参数值表

SiQDNP (mg mL ⁻¹)	Mirror Tilted 45°				Mirror Tilted 0°			
	I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	FF	Overall PCE (%)	I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	FF	Overall PCE (%)
0	1.92E-02 ±2.41E-04	0.49 ±0.01	0.584 ±0.006	2.330 ±0.025	3.26E-02 ±2.50E-04	0.51 ±0.00	0.602 ±0.002	4.273 ±0.038
0.9	1.96E-02 ±7.84E-05	0.49 ±0.00	0.587 ±0.005	2.398 ±0.012	3.30E-02 ±6.18E-05	0.51 ±0.00	0.606 ±0.002	4.353 ±0.010
1.8	1.97E-02 ±9.75E-05	0.49 ±0.00	0.590 ±0.004	2.429 ±0.004	3.34E-02 ±6.19E-05	0.51 ±0.00	0.602 ±0.002	4.366 ±0.014
2.7	1.97E-02 ±3.06E-05	0.49 ±0.00	0.602 ±0.001	2.472 ±0.002	3.34E-02 ±1.02E-04	0.51 ±0.00	0.602 ±0.005	4.368 ±0.040
3.6	1.98E-02 ±1.35E-04	0.49 ±0.00	0.594 ±0.004	2.450 ±0.017	3.33E-02 ±1.46E-04	0.51 ±0.00	0.601 ±0.005	4.352 ±0.017

[0052] 图8 (A) 中条状硅光伏板4的尺寸为13cm×1cm,硅光伏板4正好覆盖了整个发电窗面积的四分之一;图8 (B) 中每个SiQDNPs-LSC与一个硅光伏板4条耦合。发电窗的宽度(1cm)保持不变,而窗玻璃面积(W_{LSC}×W_{LSC})有所不同。在PMMA环上开了一个小孔用于注入或取出SiQDNPs悬浮液或纯的1-十八烯。

[0053] 与前文所述的单波长实验相似,和反射镜倾斜0°相比,倾斜45°的SiQDNPs-LSC显示出更高的PCE增益,但总体PCE却相对较低。此外,由于窗玻璃内部产生更多的荧光,所以随着SiQDNPs浓度的增加,PCE增益以及整体PCE也会增加。但是,当SiQDNPs浓度变得太高时,SiQDNPs吸收(尤其是在UV范围内)会饱和(图11 (A)),即SiQDNPs浓度的进一步增加不会导致产生更多的荧光。另一方面,由于高SiQDNPs浓度,重新吸收损失会增加。因此,反射镜倾斜45°和0°的SiQDNPs-LSC的PCE增益和总PCE值在高浓度3.6mg mL⁻¹时都低于低浓度2.7mg mL⁻¹。图11 (A) 穿过SiQDNPs-LSC的窗玻璃区域的透射光谱T(λ),该玻璃窗区域填充有纯1-十八烯(a曲线),0.9mg*mL⁻¹(b曲线),1.8mg*mL⁻¹(c曲线)和3.6mg*mL⁻¹(d曲线)的SiQDNPs悬浮液。随着SiQDNPs浓度增加,SiQDNPs的吸收特别是在UV范围内会趋向饱和。此外,与明视亮度函数P(λ)进行比较(黑色虚线)。图11 (B) AM 1.5G光子通量设为S_{flux}(λ)。图11 (C) AM 1.5G光谱辐照度设为S_{irradiance}(λ)。AVT计算如下:∫T(λ)P(λ)S_{flux}(λ)dλ/∫P(λ)S_{flux}(λ)dλ。基于以下估算CRI和CCT值:T(λ)S_{irradiance}(λ)。

[0054] 就光谱性质而言,由于SiQDNPs悬浮液的主要吸收处于UV范围内,而在可见光范围内几乎没有吸收,因此在窗玻璃区域测得的AVT和CRI分别超过80%和90%,分别相关色温(CCT)通常高于4000K(图7 (B)和7 (C))。此外,由于条状Si PV(宽度=1cm)组成的硅基光伏电池带是完全不透明的,因此可以通过将窗玻璃AVT乘以10²/12²来计算总的AVT。总而言之,当SiQDNPs浓度为等于2.7mg mL⁻¹时的PCE最高,反射镜倾斜45°和0°的SiQDNPs-LSC的PCE增益分别为1.06和1.02,总体PCE分别为2.47%和4.37%。窗玻璃的AVT=86%,总体AVT=60%,CRI=94,CCT=4612K。与其他太阳能发电窗技术相比,例如大容量异质结有机光伏电池(PCE=4%,AVT=64.4%,CRI=94.5),基于有机盐衍生物的近红外选择性激子半导体光伏电池(PCE=5.1%,AVT=51.5%和CRI=65.3)和基于NIR选择性LSCs(PCE=0.4%,AVT=88.3%和CRI=94.3),SiQDNPs-LSC在这项工作中获得了相似的PCE,同时由于SiQDNPs的UV选择性吸收而获得了出色的光谱特性。通过采用更大的W_{LSC},同时保持Si PV条的宽度相同,PCE增益(遵循图4所示的趋势)以及整个AVT(即窗玻璃AVT乘以系数W_{LSC}²/(W_{LSC}+2)²),可以进一步提高。

[0056] 结论:

[0057] 本发明提出的一种新颖的太阳能发电窗结构,结合了空间分段PV和LSC的概念;窗玻璃由夹在两个薄玻璃板之间的SiQDNP悬浮薄层组成,而沿着LSC周边正向放置的Si PV条形成了发电窗;在日光下,正向放置的硅光伏板(Si PV)不仅直接收集太阳能辐射,而且还会利用从窗玻璃传导过来的SiQDNP产生的荧光。

[0058] 通过氢硅烷化将SiQDNP($<10\text{nm}$)与1-辛烯进行化学接枝,以在1-辛烯中形成均匀且稳定的悬浮液。SiQDNP悬浮液在350nm UV光处的选择性吸收摩尔消光系数等于 $2.68 \times 10^5\text{M}^{-1}\text{cm}^{-1}$,并以42%的PLQY值重新发出红色荧光(峰值约为650nm)。通常SiQDNP-LSC的PCE增益与窗玻璃大小(W_{LSC})以及SiQDNP吸收成正比。在365nm紫外线照射下,SiQDNP-LSC的PCE增益($W_{\text{LSC}}=10\text{cm}$,SiQDNP浓度= $0.7\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$,反射镜倾斜 45°)可以高达2.24,其对应于光学效率(η_{opt})等于49%。相比之下,斯涅尔定律定义的最大理论 η_{opt} 为72%。在这里,主要的光学损耗是由于钠钙玻璃平板的吸收而不是SiQDNP重吸收。最后,在模拟阳光下,SiQDNP-LSC($W_{\text{LSC}}=10\text{cm}$,SiQDNP浓度= $2.7\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$,反射镜倾斜 45°)的总体PCE=2.47%,PCE增益=1.06,窗玻璃AVT=86%,总体AVT=60%,CRI=94,CCT=4612K。

[0059] 与其他太阳能窗口技术相比,这项工作中的SiQDNP-LSC获得了相似的PCE,同时由于SiQDNP的紫外线选择性吸收而获得了出色的光谱特性。

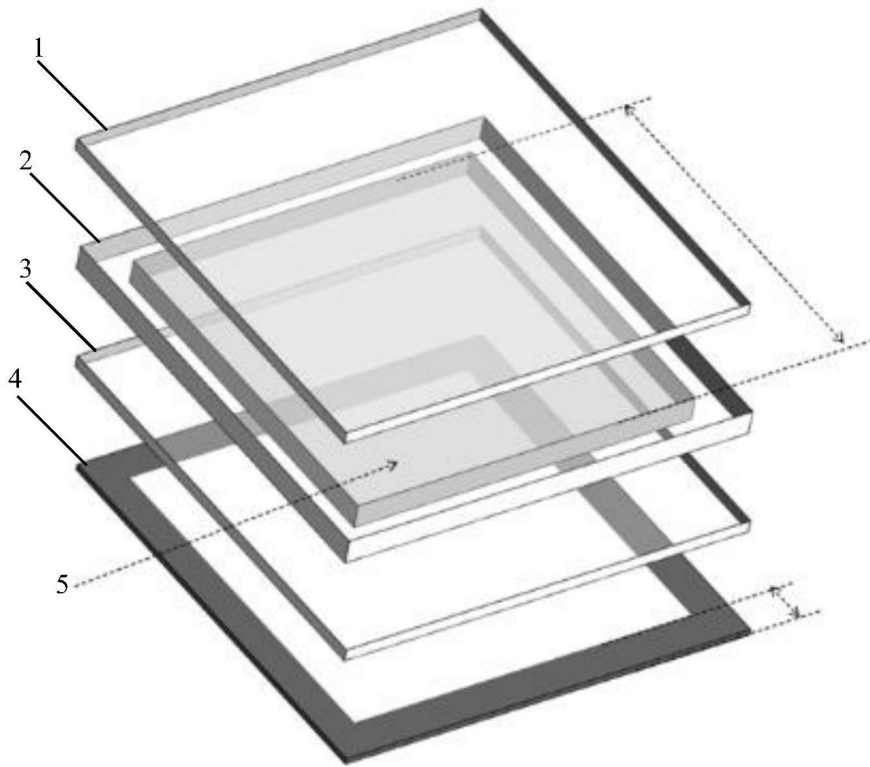


图1

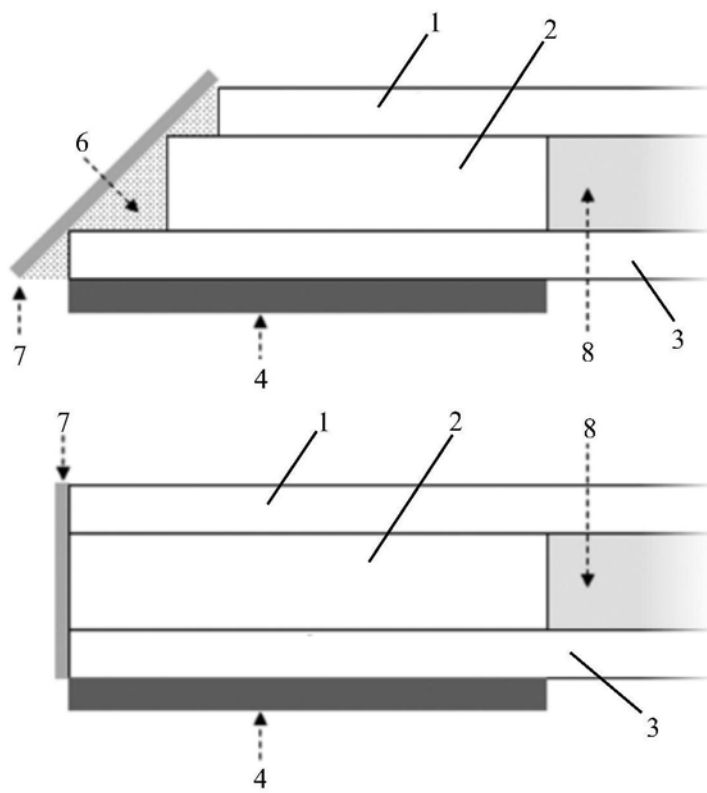


图2

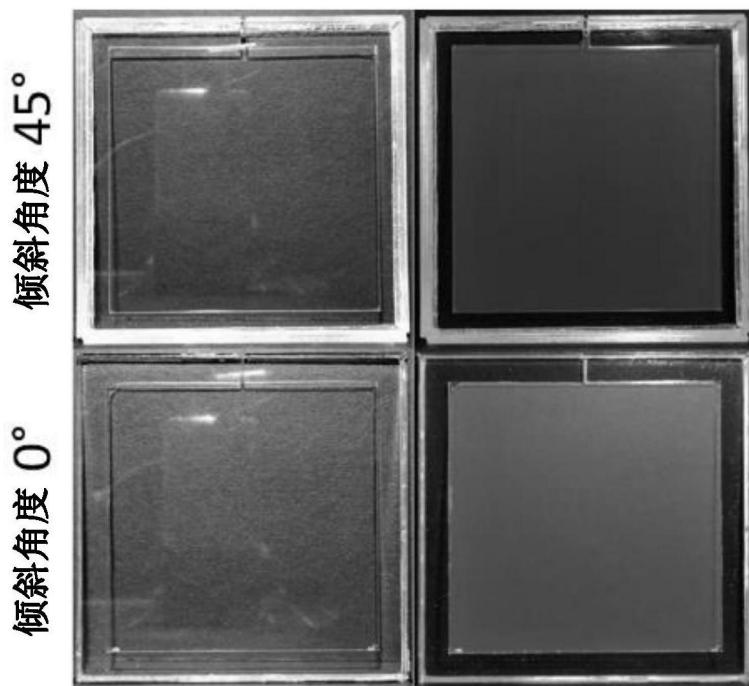


图3

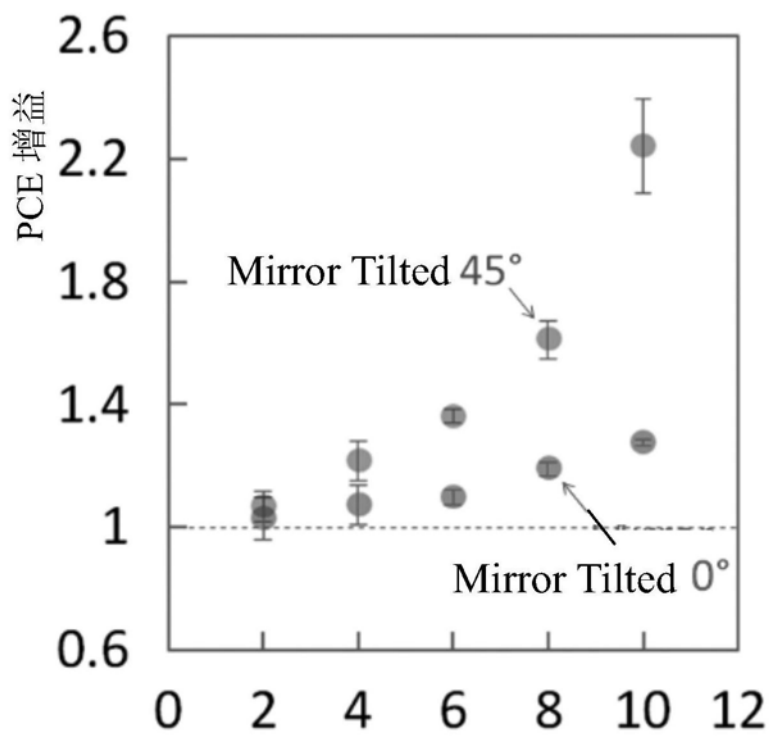


图4

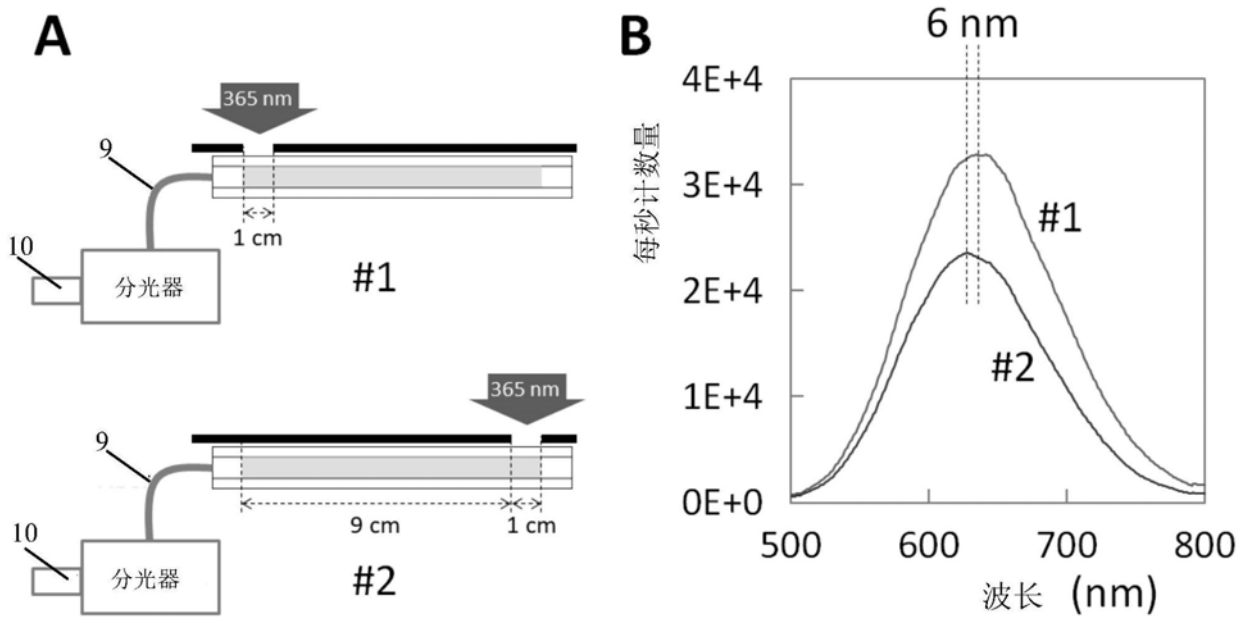


图5

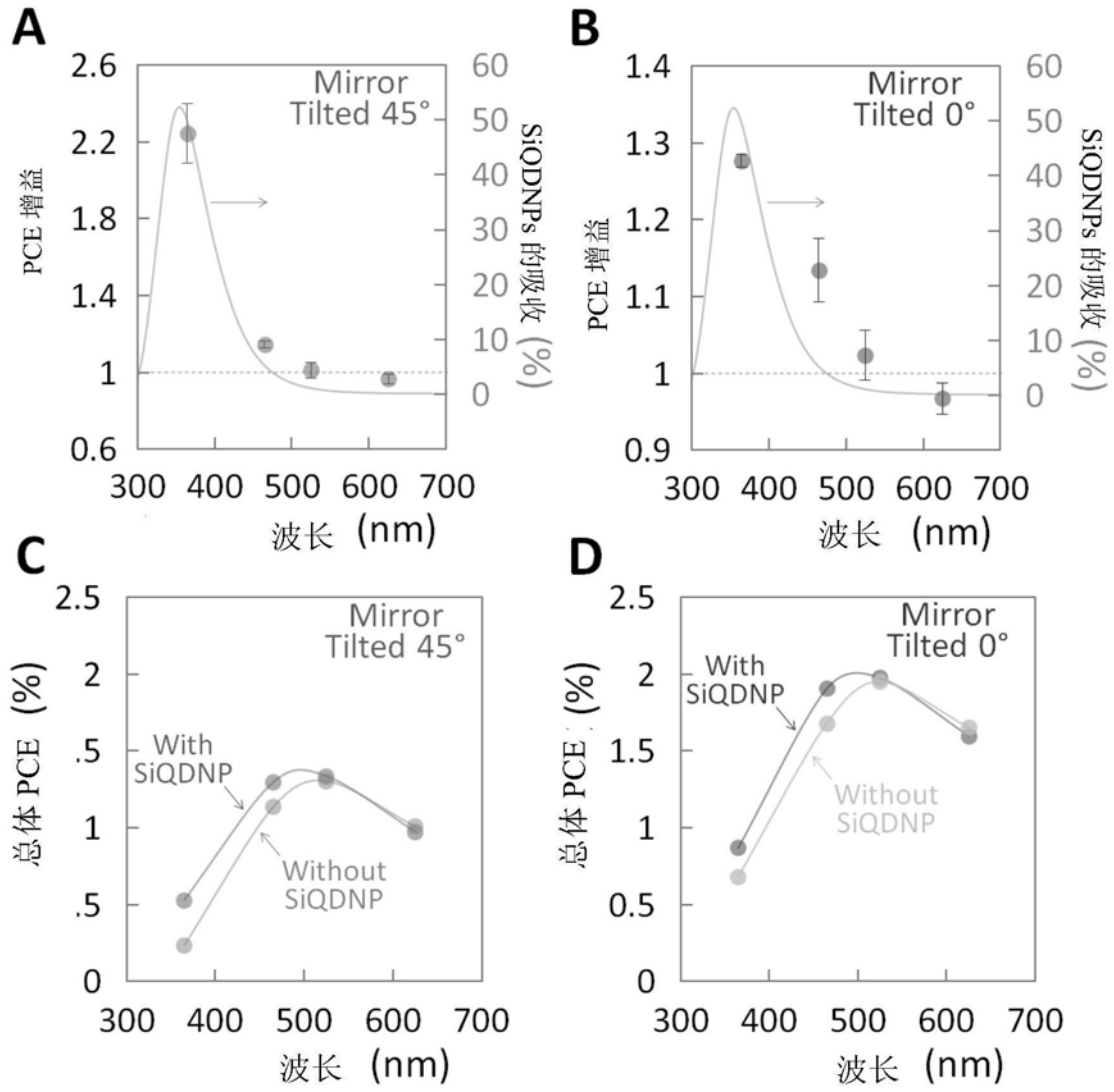


图6

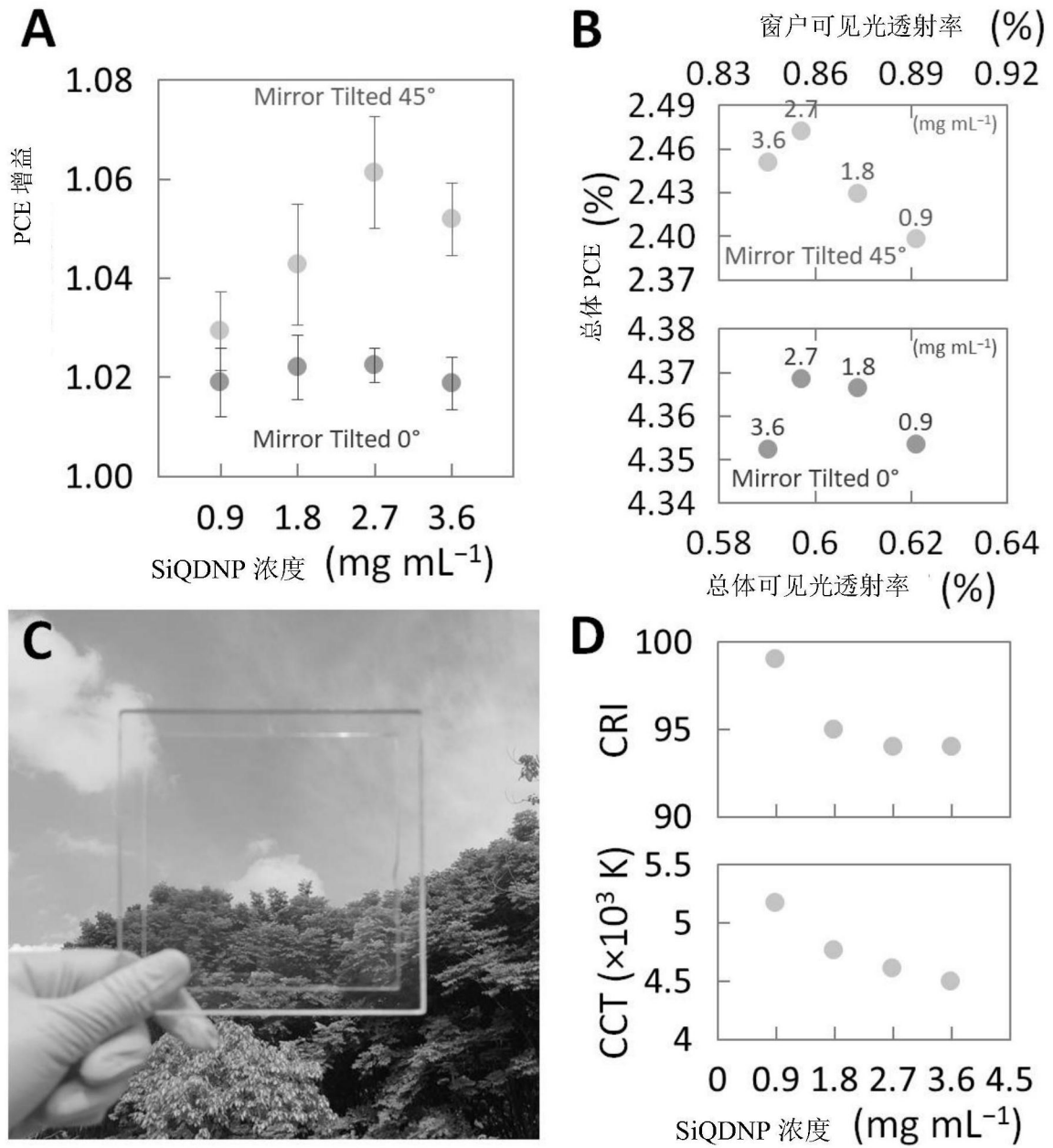


图7

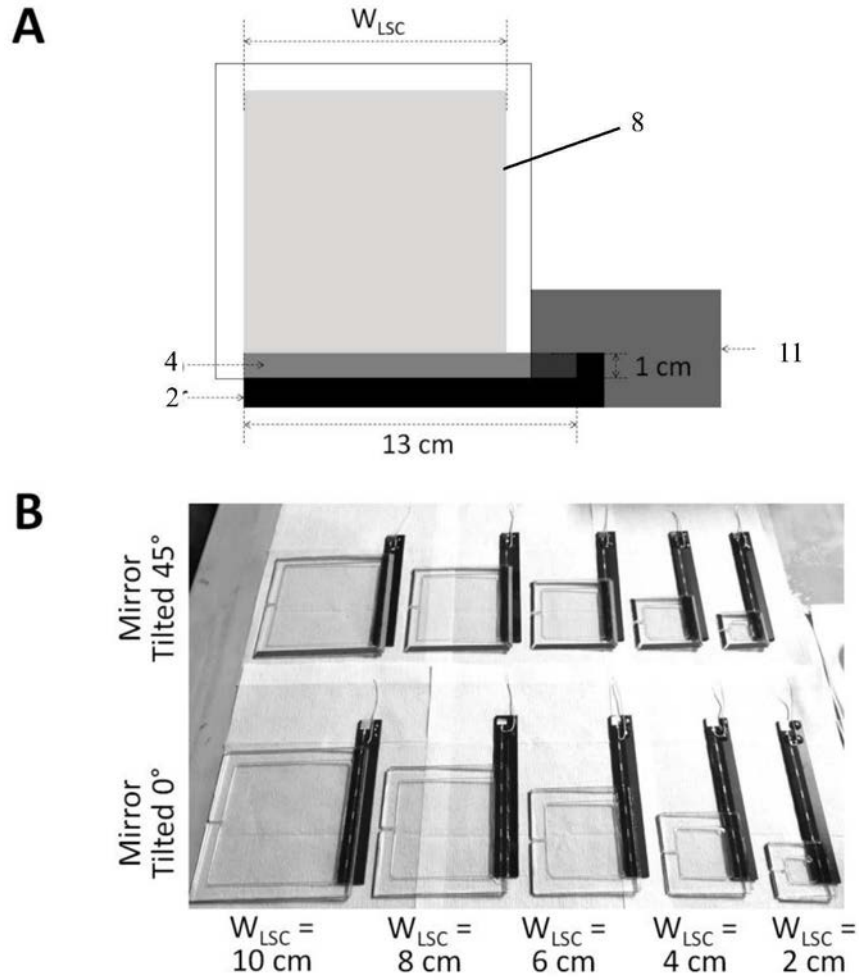


图8

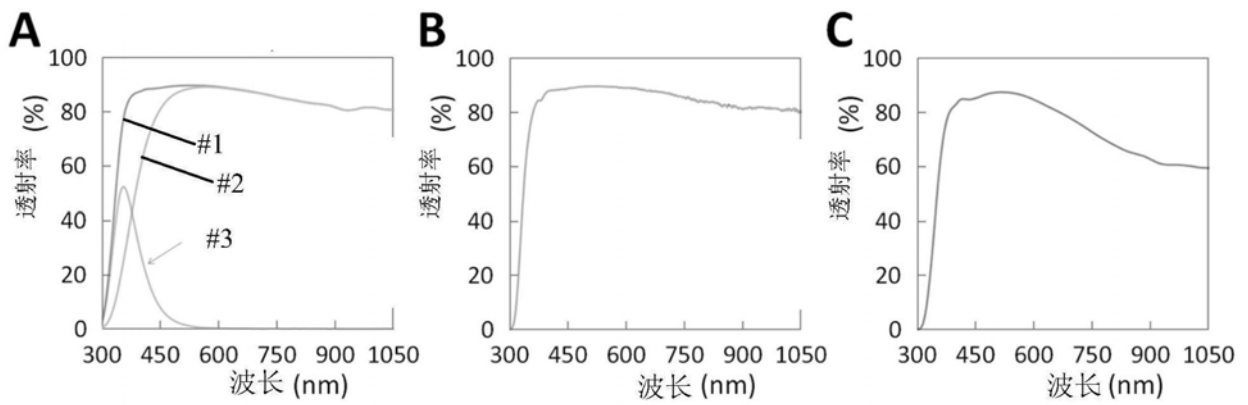


图9

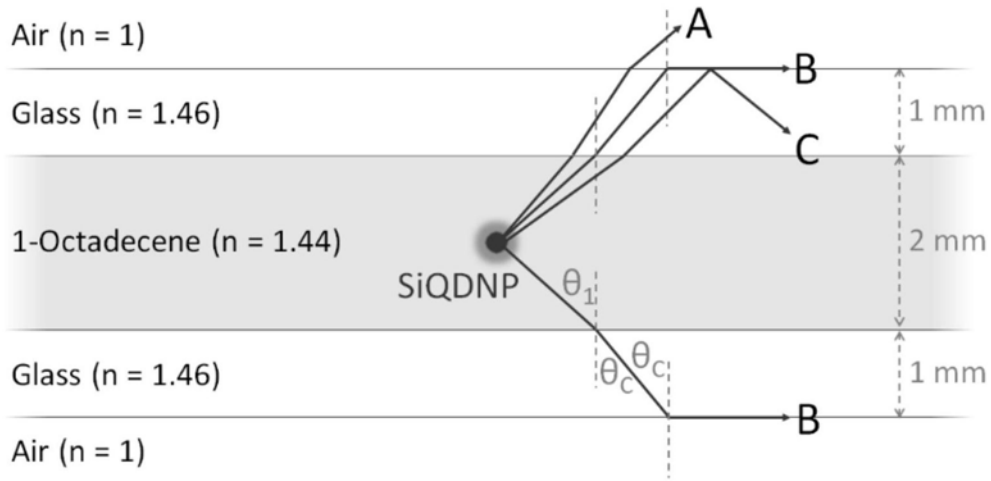


图10

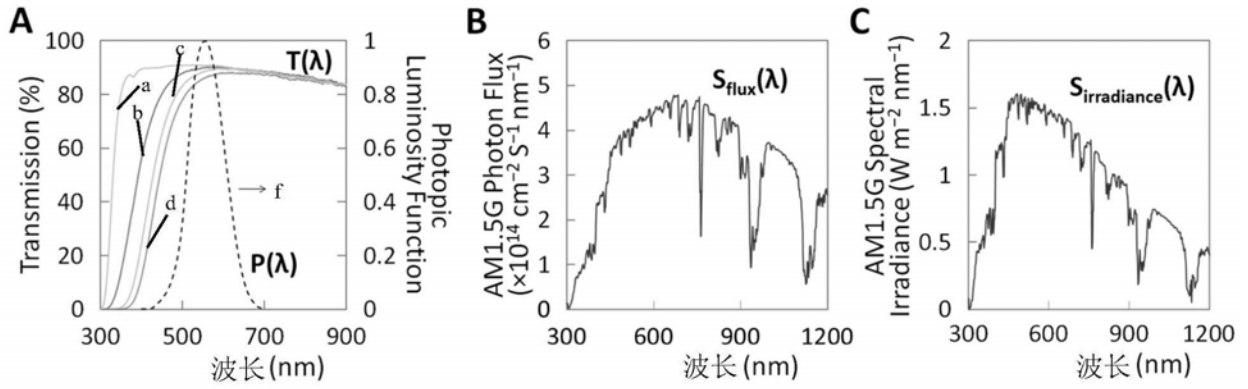


图11