

等离子体太阳电池的研究进展*

段春艳, 沈 辉

(中山大学太阳能系统研究所//广东省教育厅太阳能重点实验室//
国家新能源工程技术研究中心华南分中心, 广东 广州 510006)

摘 要: 高效太阳电池是近年太阳电池产业发展的目标, 等离子体太阳电池技术则是近年来研究的比较活跃的高效太阳电池技术之一。该文对等离子体太阳电池, 从原理, 材料到技术的最新研究进展做了比较全面的论述。等离子体太阳电池主要是利用贵金属纳米颗粒的表面等离子体效应增强太阳电池的光吸收。该技术既可以用在传统的硅电池上也可以用在薄膜电池上, 尤其适用于作为薄膜电池的陷光结构, 并且易于和传统的电池制造工艺相结合, 有实现商业化的潜力。

关键词: 贵金属纳米颗粒; 太阳电池; 表面等离子体

中图分类号: TK514 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2011) 03-0035-08

High Efficiency Solar Cells-Research Progress of Plasmonic Solar Cells

DUAN Chunyan, SHEN Hui

(Key Laboratory of Solar Energy Department of Education of Guangdong Province//
National Engineering Research Center for Renewable Energy center of South China//
Institute for Solar Energy Systems, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: High efficiency solar cells are development goal of Solar cell industry. Plasmonic solar cell technology is one of technologies of high efficiency solar cells which have been researched actively in recent years. The research progress of plasmonic solar cell, from principle, materials to technology, was discussed comprehensively. Surface plasmon resonance effect of noble metal nanoparticles was used to enhance optical absorption in plasmonic solar cells. The technology can be used both in traditional silicon solar cells and thin film solar cells, especially in light trapping structure design of thin film solar cells. Moreover, the technology can easy combine with traditional manufacturing process and has the potential to achieve commercialization.

Key words: metal nanoparticle; solar cell; surface plasmons

太阳能是一种干净、清洁、无污染且取之不尽、用之不竭的能源, 近年由于能源短缺和环境污染等问题, 发展利用太阳能的光伏产业引起了世界各国的重视。光伏产业发展很快, 但提高效率和降低成本却始终是其进一步扩大发展和应用的热点问题。目前主流的晶体硅太阳电池, 其转换效率的理论界限约为 29%; 在实用水准, 25% ~ 26% 已是上限。未来将有赖于新技术的研发, 诸如利用量子

效应^[1], 聚光装置, 采用新材料, 如上下转化材料^[2-3], 金属纳米颗粒阵列等。本文主要介绍利用金属纳米颗粒提高太阳电池光吸收和转换效率的等离子体太阳电池的研究概况和进展。

1 等离子体太阳电池

表面等离子体 (Surface plasmons) 是一种电磁表面波, 在表面处场强最大, 在垂直于界面方向呈

* 收稿日期: 2010-10-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61076059)

作者简介: 段春艳 (1976 年生), 女, 博士后; 通讯作者: 沈辉; E-mail: shenhui1956@163.com

指数衰减场,其既能被电子也能被光波激发。在适当的电磁波激发下,金属表面的自由电子(等离子体)与电磁波耦合产生集体震荡,即所谓的表面等离子体共振。表面等离子体共振发生于金属与介质的交界面。随着纳米技术的发展,表面等离子体被广泛应用于光子学,数据存储,显微镜,生物传感,太阳电池等不同的领域。

金属纳米颗粒应用于太阳电池时,主要是利用其表面等离子体震荡效应,纳米颗粒及其之间的表面等离子体的相互作用可以增强对入射光的散射,使更多的光散射到 Si 衬底,由此可以增强其对光的吸收,进而增强太阳电池的光电流和效率。此类电池即称为等离子体太阳电池(Plasmonic solar cells)。由于金属纳米颗粒可以应用于太阳电池的上表面或背表面,应用于传统的硅电池时,可以在不改变传统工艺的基础上增强其对光的吸收效果。对于薄膜电池来说,由于其活性层较薄,传统的金字塔型光陷阱结构难以运用,需要考虑其他的光陷阱结构。如果能采用金属纳米颗粒结构的光陷阱,可以有效增强其对光的吸收,并且可以不增加电池重量,成本也较低。综合来看,由于金属纳米颗粒有效增强光捕获的能力,目前光伏产业界降低成本及提高效率的需求,以及薄膜电池急需解决的光陷阱问题,近年掀起了将贵金属纳米结构应用于太阳电池的等离子体太阳电池的研究热潮。

1.1 金属纳米颗粒的材料及沉积工艺

近年研究表面等离子体效应并用于增强器件光电流的金属纳米颗粒的材料主要有 Au, Ag, Cu, Al 等。比较来看, Au 比 Ag 对光的吸收强, Ag 比 Au 的路径长度增强要强^[4]。二者的等离子体共振波长相近,且在急需光陷阱应用的红外波长范围,大于 700 nm 时, Au 和 Ag 的介电函数是相似的^[4]。Cu 很便宜,但其比 Au 的吸收更强。由于 Ag 的低成本和其对光的低吸收,因此与 Au 相比,是更好的可选材料。虽然 Ag 必须被很好的包覆以避免氧化效应, Au 则不存在这种问题。对于 Al,则需要考虑在 1.5 eV 的带间转换以及固有氧化物对散射截面和反射率的影响^[5]。图 1 给出了 Au, Ag, Cu 的辐射效率随波长变化的关系曲线^[6],从图可以看出三种元素对光的吸收情况及不同直径时的辐射效率。综合比较各种文献可以看出,目前在等离子体太阳电池的研究中,关于 Au, Ag 纳米颗粒的应用效果的研究较多。

金属纳米颗粒应用于太阳电池上,根据沉积方式的不同,可以分为 3 类:①采用沉积胶体金属纳

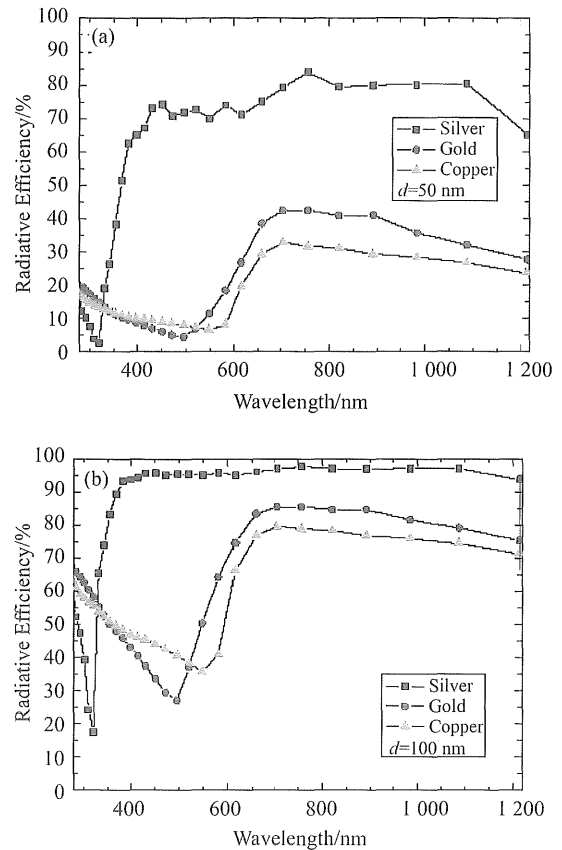


图 1 直径 50 nm (a) 和 100 nm (b) 的银,金和铜纳米颗粒在空气中的辐射效率

Fig. 1 Radiative efficiency for silver, gold and copper nanoparticles of 50 nm (a) and 100 nm (b) diameter in air

米颗粒的方式,在文献中主要用来沉积 Au 纳米颗粒阵列;②采用自组装的方式,即先在基底上镀一层纳米金属薄膜,然后在适当的温度下退火一段时间,在此过程中金属薄膜变为分散的金属纳米颗粒。③采用模板法,其中采用模板保护+镀膜的方法,可以获得分布均匀和尺寸可控的金属纳米颗粒阵列,是有待于发展的一种工艺方法。后两类方法适合制备大面积的金属纳米颗粒阵列,并且易于和太阳电池的规模化生产工艺相结合。

1.2 金属 Ag 纳米颗粒的应用

1996 年 Stuart 和 Hall^[7]发现把金属纳米颗粒 (Ag, Au, Cu) 沉积在 SOI (silicon-on-insulator) 光电探测器上,引起了光电流的增强。随后,他们进行了系列 Ag 纳米颗粒增强光电探测器的光电流及其机理的研究^[8-9]。

2006 年,澳大利亚国立大学的 Pillai 和 Catchpole 等^[10]报道了采用 Ag 纳米颗粒的局域表面等离子体 (Localized surface plasmon, LSP) 增强薄膜硅器件的光发射和吸收的可能性,认为由于 Ag 纳

米颗粒的表面等离子体激发导致的 SOI 器件的光电流增强, 也可以作为光伏电池运作。

Catchpole 博士的研究小组与荷兰的 Polman 教授 (主要研究纳米光子学)^[11], 以及新南威尔士大学合作^[12], 对等离子体太阳电池技术进行了多年的研究^[4,10,13-17]。该合作小组主要采用自组装 (蒸发 + 退火) 的方法在电池表面沉积金属纳米颗粒。

Pillai 等^[13]把 Ag 纳米颗粒应用于 SOI 结构薄膜硅太阳电池和厚的平面 PERL 硅太阳电池前表面, 光吸收都得到了增强, 在波长大于 500 nm (表面等离子体共振峰) 以上的整个光谱范围 (可见光到近红外区), 尤其在长波 1 000 ~ 1 200 nm 范围, 光电流都有显著增强。对于 SOI 结构薄膜硅太阳电池 (图 2a), 在波长为 1 050 nm 左右, 当纳米颗粒的尺寸分别相应于 Ag 膜的质量厚度为 12 nm 和 16 nm 时, 在 AM1.5 太阳光谱下, 器件的总电流分别增加了 33% 和 16%。对于平面 PERL 硅太阳电池 (图 2b), 相应于 Ag 膜的质量厚度为 12, 14, 和 16 nm, 在 AM1.5 太阳光谱下, 光电流分别增加了 19%, 14% 和 2%^[13]。光电流增加曲线如图 3 所示。把金属纳米颗粒沉积在电池的背表面, 可以避免干涉效应引起的低于共振波长波段的吸收损失, 同时允许长波长光耦合进入电池^[15]。

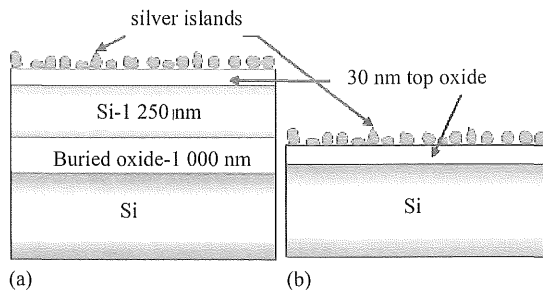


图 2 实验使用的硅电池结构
Fig. 2 The silicon cell structures used in the experiments
(a) SOI 电池 (1.25 μm 厚的硅活性层);
(b) 平面硅电池 (300 μm 厚晶圆)

Ouyang 等^[18]在固相晶化多晶硅薄膜电池 (EVA 电池) 背表面采用自组装的方法沉积 Ag 纳米颗粒 (平均直径 120 nm), 在 AM1.5 太阳光谱下, 短路电流和效率分别增加了 13% 和 10%。

为了防止纳米颗粒直接沉积在电池表面成为复合中心, 通常先沉积一层介质膜, 然后在上面沉积纳米颗粒。为了优化电池的性能, 应该在最需要优化的光谱区域最大限度的捕获光。由此, 应该尽可

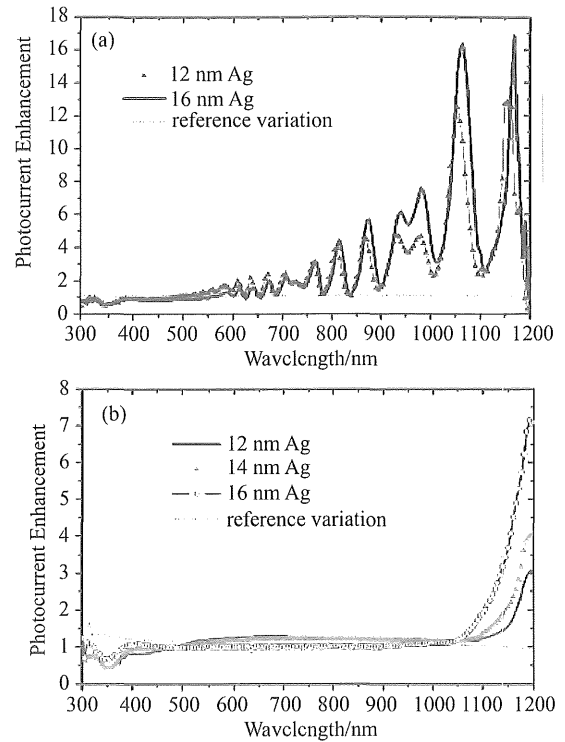


图 3 增加 Ag 纳米颗粒后 SOI 电池和平面硅电池的光电流增加
Fig. 3 Photocurrent enhancement in a SOI and a wafer-based 300 μm planar Si solar cell, due to the added Ag islands

(a) SOI 电池 (1.25 μm 厚硅活性层);
(b) 平面硅电池 (300 μm 厚晶圆)

能控制纳米颗粒在不同光谱波段的响应, 以满足电池最大限度吸收光的需要。研究显示, 介质膜的性能对纳米颗粒增强光吸收的效果有重要影响, 介质环境不同, 等离子体共振峰会发生偏移。通过调整纳米颗粒周围的介质环境的参数如介质膜的材料 (TiO_2 , Si_3N_4 , SiO_2 等)、厚度、折射率等, 可以将纳米颗粒的等离子体共振峰调制到不同的波长, 尤其是长波范围^[15]。所以, 进一步调谐等离子体共振的一个方法即是在金属纳米颗粒的上面或底部采用介质膜。

研究显示, 纳米颗粒的形状和尺寸是决定光捕获效率的关键参数^[4]。图 4 给出了几种不同形状及尺寸纳米颗粒的光散射曲线。包括直径 100 nm, 高 50 nm 的圆柱形; 直径 100 nm 的半球形; 直径 100 nm 和 150 nm 的球形; 距离 Si 衬底 10 nm 的平行电偶极子。可以看出, 在散射光到高指数衬底时, 圆柱形和半球形颗粒比球形颗粒更有效, 由于增强了近场耦合, 将光捕获在衬底内部。

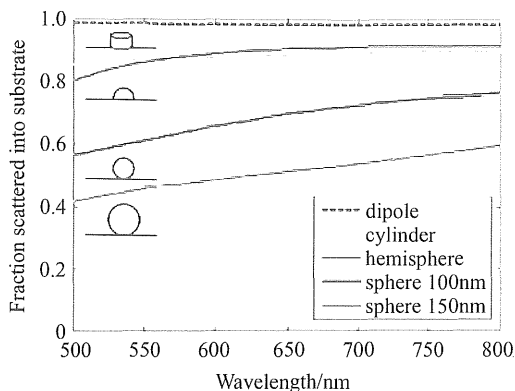


图4 10 nm厚 SiO₂ 介质层上的 Ag 纳米颗粒对光的散射情况
Fig. 4 Fraction of light scattered into the substrate for Ag particles on a 10 nm thick SiO₂ underlayer on Si

根据 LSP 的静电理论, 只有粒子的形状而不是尺寸影响 LSP 的共振波长, 但实际实验结果却不尽然。实验发现, 随着颗粒尺寸的增加光电流急剧增强。Stuart 和 Hall^[9] 发现, Ag 颗粒直径为 108 nm 时, 光电流达到最大增强。他们认为颗粒尺寸进一步增加会导致光电流增强减少, 主要因素有两个: 一个是颗粒尺寸增加超出了亚波长尺度约束; 另一个是制作较大颗粒时有产生不规则颗粒形状的趋势, 这样会加强多极震荡和降低散射。Pillai 等^[13] 发现 Ag 的质量厚度在 16 nm 时, 光电流增强最大。他们认为颗粒尺寸增加引起的光电流增强效应是由于辐射效率和散射截面的增强引起的, 同时也认为当颗粒尺寸增强超出一定限度时会使金属颗粒中产生多极震荡, 降低散射效率。因此, 为了获得尽可能宽的光谱范围内的光电流增强, 颗粒尺寸有一个最优值。

解释金属纳米颗粒应用于太阳能电池内部或表面引起的光电流增强的基本机理主要有两种: 光散射和光的近场浓度 (near-field concentration of light)。每一个机理的分析都主要依赖于颗粒尺寸, 半导体的吸收强度, 以及太阳能电池的电设计。

Stuart 和 Hall^[8] 认为, 观察到的强光电流增强是由于波导调停的金属纳米颗粒之间的相互作用。然而, 这个解释被 Catchpole 和 Pillai^[16-17] 推翻, 他们建立了理论模型, 并认为耦合金属微粒-波导系统的光电流增强是由于波导光而增强的散射截面导致的。因此, 是单个颗粒的作用, 而不是波导调停的多颗粒效应。

Catchpole 和 Polman^[14] 分析了金属纳米颗粒的光散射增强薄膜电池的光捕获能力, 这是他们已报

道的大部分实验工作所依赖的机理。由于金属中传导电子的集体震荡, 金属纳米颗粒在等离子体共振波长附近的散射很强。对于直径在光波长以下的颗粒, 单点偶极子模型很好的描述了光的吸收和散射。散射和吸收截面如下:

$$C_{scat} = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 |\alpha|^2, C_{abs} = \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im}(\alpha) \quad (1)$$

$$\alpha = 3V \left[\frac{\epsilon_p / \epsilon_m - 1}{\epsilon_p / \epsilon_m + 2} \right] \quad (2)$$

式中, α 是颗粒的极性; V 是颗粒的体积; ϵ_p 是颗粒的介电函数; ϵ_m 是埋入介质的介电函数。

当 $\epsilon_p = -2\epsilon_m$ 时, 颗粒极性变得很大, 这就是我们所说的表面等离子体共振。在等离子体共振处, 散射截面能很好的超越颗粒的几何截面。例如, 在等离子体共振处, 空气中一个很小的 Ag 纳米颗粒的散射截面是该颗粒截面面积的 10 倍, 并且散射截面可以通过增加纳米颗粒与衬底之间的距离来提高。

Catchpole 小组采用时域有限差分法 (Finite Difference Time Domain, FDTD) 进行数值模拟, 计算金属纳米颗粒的散射截面, 模拟金属纳米颗粒如 Au, Ag 的散射情况, 分析不同介质环境下金属纳米颗粒的表面等离子体效应, 优化电池中金属纳米颗粒结构的参数, 为结构设计提供参考。数值模拟计算中, 衬底如 Si 或石英假定为半无限衬底。对于 Ag, 介电函数采用 Drude 模型; 对于 Si, 介电函数采用 Drude-Lorentz 模型^[15]。增强光陷阱效果的措施之一是光路径增强, 通过 FDTD 可以计算出光路径增强的情况。决定一个散射光陷阱结构的路径增强的最重要因素是散射进衬底的光的比例 f_{subs} 。另一个重要因素是光在器件中的传播角度 (通过 d_{av} 因子描述)。一旦 f_{subs} 和 d_{av} 确定, 光路径增强即可确定。最大的光路径增强值为 $2d_{av} / (1 - f_{subs})$ 。图 5 描述了图 4 中所示的几种不同形状及尺寸纳米颗粒的光路径增强情况^[4]。其中假设有理想的后反射器。左上角为距离 Si 衬底 10 nm 的平行电偶极子和朗伯散射的散射功率的角分布, 右下角为计算光路径增强的几何图形。

除了 Catchpole 小组外, 其他小组也陆续报道了金属 Ag 纳米颗粒在不同类型电池上的应用效果。如德国于利希研究中心的 Moulin 等^[19] 在 n-i-p 型 a-Si: H 和 $\mu\text{c-Si: H}$ 薄膜太阳能电池背表面沉积 Ag 纳米颗粒 (平均直径 15 nm) 增强光的吸收。与没有纳米颗粒的电池相比, 加了金属纳米颗粒的电池在长波段有较高的吸收, 但量子效率却有所下

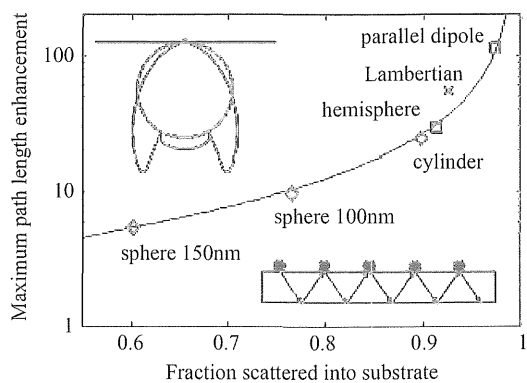


图5 几种不同形状及尺寸的纳米颗粒在波长 800 nm 时的最大光路径增强情况

Fig. 5 Maximum path length enhancement for the same geometries as in Fig. 4 at a wavelength of 800 nm with an assumed ideal rear reflector.

降。作者认为是由于纳米颗粒表面的复合损失，纳米颗粒周围的电池限制，沉积纳米颗粒导致的缺陷或纳米颗粒本身导致的光损失。挪威奥斯陆大学的 Kirkengen 等人^[20]从理论上计算了把纳米颗粒嵌入晶硅电池内部时会产生直接吸收情况。台湾的 C. C. Yang 小组在 InGaN/GaN 量子阱太阳电池中采用 Ag 纳米结构，观察到了量子阱的有效吸收增强^[21]，中科院半导体所半导体材料科学重点实验室通过模拟计算，设计了应用于 GaAs 太阳电池的 Ag 表面等离子体增强 SiO₂/Ag-ZnS 双层减反射膜^[22]。芬兰的 Antti Pennanen^[23]在其硕士论文中分析并总结了金属纳米颗粒的表面等离子体共振及其对光的散射和吸收效应的基本理论及研究进展。

Ag 纳米颗粒等离子体太阳电池在未来的研究主要是：从工艺上优化调整金属纳米颗粒阵列，如采用掩膜沉积法、软光刻技术制备大面积金属纳米颗粒图形阵列；很好的利用介质膜之间的调谐作用，优化等离子体太阳电池的结构；理论上需要考虑研究粒子间的耦合作用。

加州理工学院 Thomas J. Watson 应用物理实验室的 Keisuke Nakayama 等人^[24]采用掩膜（氧化铝模板）沉积的方法在 GaAs 太阳电池上沉积了尺寸可控的 Ag 纳米颗粒。通过化学腐蚀的方法在氧化铝模板上制作了不同密度的纳米通孔，作为蒸发 Ag 膜时的掩膜，由此在电池表面沉积了密度较大，且有高纵横比的纳米颗粒（直径 110 nm），其表面等离子体的相互作用引起的强烈散射有效的增强了吸收层中入射光的光路径，从而使电池的短路电流密度提高了 8%。美国锡拉丘兹大学的 Ozturk 等

人^[25]采用纳米球刻蚀（nanosphere lithography）的方法在氢化纳米晶硅太阳电池上沉积了 Ag 纳米盘阵列，总体光电流增强高达 10%。澳大利亚国立大学的 Mokkaapati 等^[26]采用 FDTD 法对 Ag 纳米颗粒阵列的相关参数进行优化设计，以提高其光陷阱的效率。本课题组采用自组装的方法及模板法制作了 Ag 纳米颗粒阵列陷光结构，通过纳米颗粒与介质膜的参数优化，增强电池在长波段的光吸收。

1.3 金属 Au 纳米颗粒的应用

从 2005 年开始，美国加州大学的研究小组陆续报道了在硅半导体及不同类型电池上沉积 Au 纳米颗粒，光吸收和光电流的增强情况^[11-12, 27-29]。与其他研究小组采用自组装方法获得的 Ag 纳米颗粒（图 6（a））不同^[7]，他们采用沉积胶体金属纳米颗粒的方法沉积在器件上的纳米颗粒均显示为单个的纳米颗粒，如图 6（b）所示^[11]。通过在上表面沉积不同直径（50, 80, 100 nm）和密度（ $6.6 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$, $1.6 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$, $7.7 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ ）的 Au 纳米颗粒，在等离子体共振波长（500 nm）附近，硅 pn 结的光电流响应增强了 50% - 80%^[29]。实验发现，随着颗粒尺寸的增大，等离

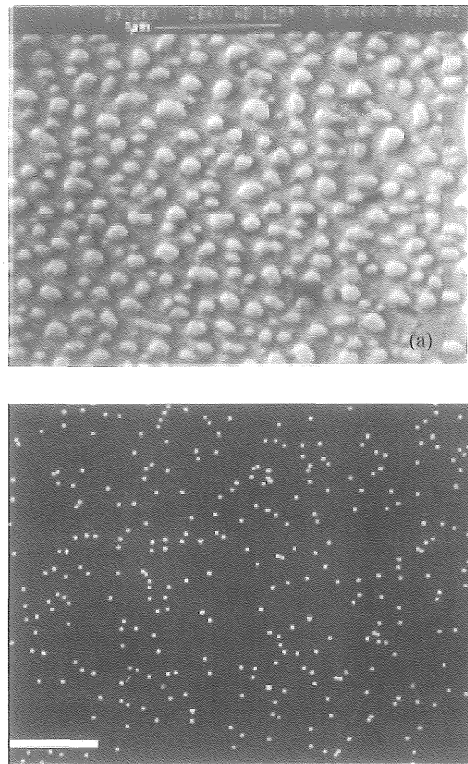


图6 采用自组装方法（a）和沉积胶体金属纳米颗粒方法（b）制作的颗粒形貌

Fig. 6 SEM images of metal nanoparticles deposited by self-assembly method (a) and in colloidal solution (b)

子体共振的响应范围扩大, 并且向长波方向红移, 但对于所有尺寸的颗粒, 光电流均在 950 nm 以上开始下降。

Schaadt 等^[29]把光电流的增强归功于 Au 纳米颗粒的表面等离子体激发提高了硅的光吸收。考虑了两个主要的原因: 第一, 由于 LSP 激发, 金属纳米颗粒附近的电场振幅远大于外电场振幅, 引起颗粒附近半导体区域的光吸收增强; 第二, LSP 激发的存在时间是光子穿过 LSP 近场距离 (100 nm) 的 5-10 倍多, 在金属纳米颗粒附近, 外电磁场和半导体之间相互作用的持续时间增加。可以看出, 此处的光电流响应增强机理解释与 Ag 纳米颗粒部分的完全不同。

2006 年, Derkacs 等^[27]报道了在非晶硅薄膜电池 (a-Si: H) 表面沉积 Au 纳米颗粒 (直径 100 nm, 密度为 $\sim 3.7 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$), 短路电流密度提高了 8.1%, 能量转换效率提高了 8.3%。将 Au 纳米颗粒沉积在 InP/GaAsP 量子阱结构的太阳能电池上^[28], 可将功率转换效率提升 17%, 克服了这类组件中光子吸收率及光生电荷载子收集率无法兼顾的问题。D. Derkacs 等结合孤立粒子的 Mie 理论和计算电磁模拟, 考虑粒子-粒子, 粒子-衬底, 粒子-衬底-粒子的相互作用, 解释了光电流增强。对测试电场的模拟显示, 从纳米颗粒过来的光波的强前向散射导致了纳米颗粒底部 a-Si: H 层的电磁场振幅增加。研究显示, 纳米颗粒的密度为 $2.5 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 时, 光吸收及效率有最大增强。

2007 年, Lim 等^[11]报道了 Au 纳米颗粒 (直径 100 nm, 密度为 $\sim 3.5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$, 等离子体共振峰在 680 nm) 应用于硅 pn 结二极管的光吸收增强的进一步研究结果, 显示在波长大于 LSP 共振波长的范围, 光电流获得了增强。但在波长低于 LSP 共振波长的范围, 光电流有一个明显的降低区间。如前所述, 光电流的增强是由于金纳米颗粒的强前向散射, 通过分析数值模拟结果, Lim 等认为低于共振波长波段的光电流降低是由于电场振幅的降低, 电场振幅的降低或增强是由入射的电磁场辐射的传输部分和 Au 纳米颗粒的散射波的干涉引起的。

在实验基础上, Matheu 等^[12]采用带有电磁模组的有限元模拟软件模拟优化 Au 纳米颗粒的密度和直径, 研究了不同密度条件下的光电流增强情况。值得一提的是, 直径 150 nm 的电介质纳米颗粒 SiO₂ 没有表面等离子体共振效应, 则避免了金属纳米颗粒在等离子体共振波长附近的吸收损失,

高密度的 SiO₂ 纳米颗粒由于大量的散射点, 把晶体硅电池的光电流增强了约 8.8%。

除了上述几个主要研究机构外, 其他国家和地区如德国^[30], 美国^[31-33], 瑞典^[34-35], 中国台湾等的一些研究机构均展开了与此相关的研究^[36], 将金属纳米颗粒结构应用于不同类型的电池上。澳大利亚斯文本科技大学的研究人员也正和中国尚德太阳能电力有限公司开发他们的等离子体薄膜太阳能电池制造技术, 有望在 4 年内实现商业化^[37]。

2 结 语

关于等离子体太阳电池的研究还有许多工艺需要改进和完善。但毫无疑问, 利用金属纳米颗粒的表面等离子体效应可以增强电池对光的吸收, 提高光电流和效率。该技术可以在基本不破坏太阳电池原有结构的基础上使用, 并且其工艺有与现有的电池制造工艺相结合使用的潜力。最关键的是, 这种技术可以应用于任何类型的太阳电池上, 包括传统的晶体硅太阳电池和新型的薄膜电池。由于其优点, 等离子体太阳电池已经引起了光伏业界的注意, 被认为是有潜力商业化的一种电池技术。当工艺经过继续改进和完善之后, 等离子体太阳电池的商业化必将指日可待。

参考文献:

- [1] LI M, LIU Y, WANG H, SHEN H, et al. CdS/CdSe co-sensitized oriented single-crystalline TiO₂ nanowire array for solar cell application[J]. J Appl Phys, 2010, 108: 094304.
- [2] LI D, DING C R, SHEN H, et al. Large improvement of photon capturing for a dye-sensitized solar cell integrated with a fluorescent layer[J]. J Phys D Appl Phys, 2010, 43: 015101.
- [3] LI D, DING C R, SONG G, et al. Controlling the morphology of erbium-doped yttrium fluoride using acids as surface modifiers: Employing adsorbed chlorine ions to inhibit the quenching of upconversion fluorescence[J], J Phys Chem C, 2010, 114: 21378-21384.
- [4] CATCHPOLE K R, POLMAN A. Design principles for particle plasmon enhanced solar cells[J]. Appl Phys Lett, 2008, 93(19): 191113.
- [5] LANGHAMMER C, SCHWIND M, KASEMO B, et al. Localized surface plasmon resonances in aluminum nanodisks[J]. Nano Letter, 2008, 8(5): 1461-1471.
- [6] JOHNSON P B, CHRISTY R W. Optical constants of the noble metals[J]. Phys Rev B, 1972, 6(12): 4370-4379.

- [7] STUART H R, HALL D G. Absorption enhancement in silicon-on-insulator waveguides using metal island films [J]. *Appl Phys Lett*, 1996, 69(16): 2327–2329.
- [8] STUART H R, HALL D G. Enhanced dipole-dipole interaction between elementary radiators near a surface [J]. *Phys Rev Lett*, 1998, 80(25): 5663–5666.
- [9] STUART H R, HALL D G. Island size effects in nanoparticle-enhanced photodetectors [J]. *Appl Phys Lett*, 1998, 73(26): 3815–3817.
- [10] PILLAI S, CATCHPOLE K R, TRUPKE T, et al. Enhanced emission from si-based light-emitting diodes using surface plasmons [J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 88(16): 161102.
- [11] LIM S H, MAR W, MATHEU P, et al. Photocurrent spectroscopy of optical absorption enhancement in silicon photodiodes via scattering from surface plasmon polaritons in gold nanoparticles [J]. *J Appl Phys*, 2007, 101(10): 104309.
- [12] MATHEU P, LIM S H, DERKACS D, et al. Metal and dielectric nanoparticle scattering for improved optical absorption in photovoltaic devices [J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 93(11): 113108.
- [13] PILLAI S, CATCHPOLE K R, TRUPKE T, et al. Surface plasmon enhanced silicon solar cells [J]. *J Appl Phys*, 2007, 101(9): 093105.
- [14] CATCHPOLE K R, POLMAN A. Plasmonic solar cells [J]. *Opt Express*, 2008, 16(26): 21793–21800.
- [15] BECK F J, POLMAN A, CATCHPOLE K R. Tunable light trapping for solar cells using localized surface plasmons [J]. *J Appl Phys*, 2009, 105(11): 114310.
- [16] CATCHPOLE K R, PILLAI S. Absorption enhancement due to scattering by dipoles into silicon waveguides [J]. *J Appl Phys*, 2006, 100(4): 044504.
- [17] CATCHPOLE K R, PILLAI S. Surface plasmons for enhanced silicon light emitting diodes and solar cells [J]. *J Lumin*, 2006, 121(2): 315–318.
- [18] OUYANG Z, BECK F, KUNZ O, et al. Enhanced photocurrent in evaporated solid-phase-crystallised poly-si thin-film solar cells using rear surface plasmons [C] // 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, Germany: 2009, 9, 21–25.
- [19] MOULIN E, SUKMANOWSKI J, SCHULTE M, et al. Thin-film silicon solar cells with integrated silver nanoparticles [J]. *Thin Solid Films*, 2008, 516(20): 6813–6817.
- [20] KIRKENGEM M, BERGLI J, GALPERIN Y M. Direct generation of charge carriers in c-Si solar cells due to embedded nanoparticles [J]. *J Appl Phys*, 2007, 102(9): 093713.
- [21] LU Y C, CHEN C Y, SHEN K C, et al. Enhanced photoluminescence excitation in surface plasmon coupling with an InGaN/GaN quantum well [J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 91(18): 183107.
- [22] WANG Y S, CHEN N F, ZHANG X W, et al. Ag surface Plasmon enhanced double-layer antireflection coating for GaAs solar cells [J]. *Chin J Semicond*, 2009, 30(7): 072005.
- [23] PENNANEN A. Enhancing silicon solar cell efficiency with metal nanoparticles: Master thesis [D]. Finland: University of Jyväskylä, 2009.
- [24] KEISUKE N, KATSUAKI T, HARRY A A. Plasmonic nanoparticle enhanced light absorption in GaAs solar cells [J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 93(12): 121904.
- [25] OZTURK B, SCHIFF E A, ZHAO H, et al. Nanosphere lithography of nanostructured silver films on thin-film silicon solar cells for light trapping [J]. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 2009, 1153: A04–17.
- [26] MOKKAPATI S, BECK F J, POLMAN A, et al. Designing periodic arrays of metal nanoparticles for light-trapping applications in solar cells [J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 95(5): 053115.
- [27] DERKACS D, LIM S H, MATHEU P, et al. Improved performance of amorphous silicon solar cells via scattering from surface plasmon polaritons in nearby metallic nanoparticles [J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 89(9): 093103.
- [28] DERKACS D, CHEN W V, MATHEU P M, et al. Nanoparticle-induced light scattering for improved performance of quantum-well solar cells [J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 93(9): 091107.
- [29] SCHAADT D M, FENG B, YU E T. Enhanced semiconductor optical absorption via surface plasmon excitation in metal nanoparticles [J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 86(6): 063106.
- [30] WESTPHALEN M, KREIBIG U, ROSTALSKI J, et al. Metal cluster enhanced organic solar cells [J]. *Sol Energ Mat Sol C*, 2000, 61(1): 97–105.
- [31] RAND B P, PEUMANS P, FORREST S R. Long-range absorption enhancement in organic tandem thin film solar cells containing silver nanoclusters [J]. *J Appl Phys*, 2004, 96(12): 7519.
- [32] MORFA A J, ROWLEN K L, REILLY T H III, et al. Plasmon-enhanced solar energy conversion in organic bulk heterojunction photovoltaics [J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 92(1): 013504.

慢、车辆覆盖率低等问题,提出了基于层次网格索引的大批监控车辆显示模型,为车辆建立多层网格索引,结合地图显示比例尺动态聚合重叠显示的车辆,实现了车辆监控的全面性,降低了数据传输量,提高了车辆显示速度。

1) 提出车辆监控中大批车辆显示模型,必须满足覆盖率、数据传输量、响应速度等指标。

2) 提出了将网格索引应用于车辆显示,将层次网格和比例尺关联起来,动态聚合重叠显示的车辆,降低了数据传输量,提高了响应时间。

3) 以广东省重点车辆监控系统为例,分别在服务器端和客户端实现了模型并验证其有效性。

参考文献:

- [1] 谭仁春. 三维城市模型的研究现状综述[J]. 城市勘测, 2007(5):42-46.
- [2] 陈锐祥,何兆成,黄敏等. Google Earth 在交通信息服务系统中的应用研究[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2007,46(2):195-198.
- [3] 张存保,杨晓光,严新平. 浮动车采样周期优化方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息,2007,7(3):100-104.
- [4] 张新长,黄秋华,杨剑. 土地利用数据在不同尺度下的精度损失模型研究[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2007,46(3):103-106.
- [5] 李德仁,崔巍. 地理本体与空间信息多级网格[J]. 测绘学报,2006,35(2):143-148.
- [6] 周勇,何建农,涂平. 一种改进的自适应层次网格空间索引查询算法[J]. 计算机工程与应用,2006:159-161.
- [7] 李德仁,肖志峰,朱欣焰. 空间信息多级网格的划分方法及编码研究[J]. 测绘学报,2006,35(1):52-56.
- [8] 吴长彬,闫国年,刘昱君. 基于规则库和网格算法的土地利用现状图自动数字注记[J]. 测绘学报,2008,37(2):250-255.
- [9] 王映辉. 一种 GIS 自适应层次网格空间索引算法[J]. 计算机工程与应用,2003,9:58-60.
- [10] 胡久乡,何松,钟瑜. 空间数据库网格索引机制的最优划分[J]. 计算机学报,2002,25(11):1227-1230.
- [11] 邵振峰,李德仁. 基于网格计算环境下的空间信息多级格网研究[J]. 地理信息世界,2005,3(2):31-35.
- [12] LI Wei, ZHANG Rong, LIU Zhengkai. An approach of laser-based vehicle monitor [J]. Applied Mathematics and Computation,2007,185:953-962.
- [13] LI Qingquan, ZHANG Tong, WANG Handong. Dynamic accessibility mapping using floating oating car data: a network-constrained density estimation approach [J]. Journal of Transport Geography, 2011, 19 (3): 379-393.
- [14] LOUKAS G A, BALAJI R, DANIEL P B. Multire-source inventories in corporating GIS, GPS and database management systems: a conceptual model[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2000, 28: 89-100.
- [33] KONDA R B, MUNDLE R, MUSTAFA H, et al. Surface plasmon excitation via Au nanoparticles in n-CdSe/p-Si heterojunction diodes[J]. Appl Phys Lett, 2007, 91(19): 191111.
- [34] HAGGLUND C, ZACH M, KASEMO B. Enhanced charge carrier generation in dye sensitized solar cells by nanoparticle plasmons[J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(1): 013113.
- [35] TVINGSTEDT K, PERSSON N K, INGANAS O, Surface Plasmon increase absorption in polymer photovoltaic cells [J]. Appl Phys Lett, 2007, 91(11): 113514.
- [36] LU Y C, CHEN C Y, SHEN K C, et al. Enhanced photoluminescence excitation in surface Plasmon coupling with an InGaN/GaN quantum well[J]. Appl Phys Lett, 2007, 91(18): 183107.
- [37] JOHNSTONE B. Technology Review 10: Light-Trapping Photovoltaics [EB/OL]. (2010-04-20) [2010-09-14] <http://www.technologyreview.com/energy/25083/>.

(上接第41页)