

PbS胶质量子点太阳能电池的性能参数及主要结构

王亚非, 王 静, 高椿明

(电子科技大学光电信息学院 成都 610054)

【摘要】基于胶质量子点(CQD)半导体材料的第三代薄膜太阳能电池, 因为材料的量子尺寸调谐特性, 在宽光谱太阳能发电领域有其独特的优势。该文将CQD薄膜近似为传统半导体材料, 介绍了CQD太阳能电池的工作原理及表征电池性能的主要参数, 指明了CQD材料与块半导体材料的差异, 分析了影响CQD电池性能的材料方面的几个因素。按照研究的时间顺序, 回顾了6种结构的PbS CQD电池发展情况及最新现状, 指出提升材料性能, 改进材料中光电转换过程的物理模型, 及优化器件结构都能够帮助提高CQD电池的效率。

关键词 载流子输运; 胶质量子点; P-N结; 太阳能电池

中图分类号 TN2

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2015.02.024

Review of PbS Colloidal Quantum Dots Photovoltaic

WANG Ya-fei, WANG Jing, and GAO Chun-ming

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract The third generation photovoltaic devices based on solution-processed colloidal quantum dot (CQD) have particular advantage for harvesting sun's broad spectrum, because of the size tunability of CQD's bandgap. In the review, firstly, the fundamentals of solar cell and four key parameters were introduced. Secondly, evident deviations of CQD films from the homogenous bulk semiconductor were pointed out and the effects of CQD's properties on solar cell efficiency were analyzed. Finally, some main device architectures of PbS CQD solar cells developed in recent years were summarized. Advanced CQD thin films, more accurate exciton transport physical model, and better device architectures would help to improve the efficiency of CQD solar cells.

Key words carriers transport; colloidal quantum dot (CQD); P-N junction; solar cell

日趋严峻的能源紧缺、环境污染等问题, 促使人们必须发展一种能够同时满足高效和低成本要求的光伏发电技术。胶体量子点(CQD)材料可在水溶液中直接合成, 通过逐层旋涂在基底上形成固体薄膜, 是非常优质的第三代太阳能电池材料, 具有成本低、方法简单、可实现大面积铺设等优点。CQD电池的理论效率可以达到40%, 要想实现这种电池的大范围投入使用, 其效率要达到15%以上^[1-2]。目前最新报道的PbS CQD非聚焦太阳能电池在1个太阳的光强照射下(约100 mW/cm²), 效率约为8.5%^[3]。

量子点三个维度的尺寸均小于对应体材料激子的玻尔半径, 其内部电子在各方向上的运动都受到局限, 即量子局限效应(quantum confinement effect)特别显著^[4]。CQD材料的光学和电学性质随着量子点尺寸的不同而变化^[5-8], 不同尺寸的量子点具有不

同的禁带宽度^[9-10], 可吸收不同波长的太阳光。如果在一个电池中含有多层不同尺寸的CQD, 那么它能够吸收的太阳光谱范围很宽。PbS激子的玻尔半径是18 nm, 在合成过程中控制量子点的尺寸使其吸收波长范围在600~3 000 nm内变化^[11]。基于PbS CQD材料的太阳能电池是近年来的研究热点^[12-19]。

本文首先介绍了量子点太阳能电池的工作原理、模型及描述电池性能的主要参数, 其次就影响量子点太阳能电池转换效率的几个因素进行了分析, 最后介绍了近5年发展的几种结构的PbS CQD太阳能电池。

1 工作模型及主要参数

在CQD薄膜内通过吸收光子产生的电子-空穴对, 必须被有效地分离并且被各自的电极收集, 才

收稿日期: 2014-01-15; 修回日期: 2014-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(50506006, 61379013); 四川省青年基金人才培养计划(2011JQ0025); 中央高校基本科研业务费(ZYGX2012Z006)

作者简介: 王亚非(1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电磁场与波、微波声学、声光及光声技术等方面的研究。

能产生光电流和光电压。目前,研究人员用一个简化的模型——半导体P-N结^[20],来描述量子点电池的工作特性,将CQD薄膜近似为具有平均电子和空穴迁移率、载流子寿命及介电常数等参数的均匀半导体介质。该模型能成功描述量子点电池工作特性曲线,这表明应用于传统P-N结太阳能电池的肖克莱-奎赛尔能量转换效率理论极限模型也可以用来计算CQD电池的理论效率。

P-N结太阳能电池工作时,如果电池与负载电阻接成通路,通过负载的电流密度应为^[21]:

$$J = J_L - J_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + JR_s)}{A_0 kT}\right) - 1 \right] - \frac{V + JR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中, V 是光生电压; J_L 是光生电流密度; J_0 是反向饱和电流密度; A_0 是二极管理想因子; R_s 是串联电阻包括扩散层的薄层电阻、基区材料本身的电阻、电极与半导体的接触电阻、电极的电阻等; R_{sh} 是并联电阻,主要与载流子的复合损失相关。式(1)是负载电阻上电流与电压(J - V)的关系,即电池的伏安特性。在P-N结开路情况下,两端的电压即为开路电压 V_{oc} ,是太阳能电池所能产生的最大电压,反映了P-N结两端p型材料和n型材料的准费米能级之差。当P-N结短路时得到的电流密度是短路电流密度 J_{sc} ,表示能够从电池中收集到单位面积内最大光生载流子数。

太阳能电池一般工作在 $0 \sim V_{oc}$ 之间,其输出功率最大值对应的电压和电流分别为 V_m 和 I_m ,在光电池的伏安特性曲线上的最大输出功率等于该点所对应的矩形面积。描述电池性能的参数填充因子为:

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (2)$$

太阳能电池的能量转换效率是电池在光照下产生的电能与入射光能量之比,为:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \quad (3)$$

V_{oc} 、 J_{sc} 或 I_{sc} 、 FF 和 η 4个参数是评价太阳能电池性能的最重要参数。 R_s 增大对开路电压没有影响,但会使 J_{sc} 变小,而 R_{sh} 减小则会使 V_{oc} 降低。另外大的 R_{sh} 和小的 R_s 能够使电池得到更高的填充因数。由式(3)可知,增大并联电阻,减小串联电阻可以提高太阳能电池的转换效率。

2 影响CQD电池性能的几个主要问题

虽然在电池 J - V 特性曲线分析中,将CQD薄膜材料近似为均匀的半导体体材料,但它们之间仍然存在不能被忽视的差异。首先,在半导体CQD薄膜中,

量子点四周充满了绝缘胶质材料,因此光生载流子很大程度上被限制在量子点内部,很难挣脱量子限制发生自由运动,CQD薄膜的载流子输运机制为隧穿或跳跃^[22-25],而非传统半导体中的载流子浓度差导致的扩散运动。其次,由于PbS CQD是近似球形的纳米晶体块,在一个薄膜材料中存在数目巨大的量子点,造成了非常大的内部面容比(surface to volume ratio),每一个量子点的球形表面都与周围的胶质基质相接触,这种情况在很大程度上影响材料的掺杂水平和缺陷态浓度。

目前人们重点研究的影响CQD太阳能电池转换效率的因素有:

1) 由于量子局限效应,量子点内产生的载流子以激子(电子-空穴对)形式存在,激子必须在弛豫回基态之前离解,离解的电子和空穴要运动足够远的距离后被各自电极收集,这需要漂移长度大于耗尽层宽度,而扩散长度大于准中性区域的厚度。有研究表明激子在有电场存在下能够很容易地被离解^[26],在一个厚度大于200 nm(远大于激子扩散长度)的CQD薄膜中,光电流的产生也证明了电子-空穴对的迅速离解^[13]。CQD中载流子的输运长度大约在10~100 nm之间^[27],而为了使入射光尽量充足地被吸收,CQD薄膜的厚度至少为200 nm,所以要实现光生载流子高效地被电极收集输送到外电路中,应尽可能提高材料的迁移率,最低为 $0.01 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 。

2) 虽然经过20多年的发展,量子点材料的制备工艺已经取得了巨大的进展,但即使在单一尺寸的CQD材料中,不可避免会存在尺寸分布(约为5%)^[28-29]。量子点材料的性质随着尺寸而变化,所以载流子在薄膜内运动的性质会随着尺寸不同而改变,这使得CQD薄膜中载流子的输运过程更加复杂。另外,小的量子点具有更大的禁带宽度,在CQD薄膜中会发生福斯特共振能量转移(Förster resonant energy transfer, FRET)^[30],即处于小尺寸量子点较低激子能级上的激子能够跳跃或隧穿到邻近的大尺寸量子点的较高能级上,这使得一个薄膜中的激子会流向最大的量子点中(具有最小的禁带宽度),最终复合或离解,这对电池电流的收集和电压的产生都有影响。

3) 电子缺陷在半导体中起着重要作用,深能级陷阱担任复合中心的作用,能捕获电子和空穴使其最终复合,浅能级陷阱对应的能级具有较低的迁移率,电子被该能级捕获输运过程会受到延迟^[31-32]。研究发现改进CQD薄膜的表面钝化情况^[33-34],能够

提高材料的迁移率, 因为钝化处理降低了CQD薄膜表面缺陷的浓度, 而这些缺陷正是陷阱能级的来源。

4) 与所有的半导体器件一样, 材料界面情况在CQD太阳能电池中也非常重要^[35]。将电子和空穴从CQD薄膜中提取出来注入到对应的载流子收集材料中并被两端电极有效收集, 这一过程对电池的效率有很大影响。交界面的缺陷, 如晶格应变和悬空键能够产生复合中心消耗载流子^[36]。另外, 通过调节CQD薄膜与载流子接收层材料的导带或价带的补偿量, 可以调节双方之间载流子的注入量, 任何载流子的反向注入(从电极材料到CQD薄膜)都会降低器件的并联电阻, 从而降低FF, 影响电池效率。

可见改进CQD薄膜材料的载流子输运性质, 对提升电池的性能至关重要。在对PbS CQD材料进行研究分析过程中, 发现光致发光方法是研究人员普遍采用的分析CQD材料激子寿命、能级结构等参数的实验手段^[37-40], 然而光致发光所测的激子寿命误差大, 尤其是对激子弛豫等动态过程的检测精度不够。精确的激子寿命测试是建立精确可靠的载流子

输运模型, 分析CQD材料中的动态物理过程的基础。人们采用的光载流子辐射测量方法^[41-42], 是一种动态频域调制光致发光方法, 能够产生更精确的激子寿命及寿命分布谱^[43], 这些寿命分布代表CQD薄膜中激子弛豫的不同机制。

3 6种不同结构的太阳能电池

3.1 肖特基电池

肖特基电池的结构如图1所示, 由透明氧化物ITO电极、光吸收材料CQD薄膜和背面金属电极组成。文献[2]报道了第一个转换效率超过1%的基于肖特基结构的CQD太阳能电池(本文中的转换效率都是在光照条件模拟为AM1.5的情况下, 光强为1个太阳=100 mW/cm²时所得到的效率), 该电池的肖特基势垒由p型PbS CQD和铝构成, 测得 $V_{oc}=0.33$ V, $J_{sc}=12.3$ mA/cm²^[44]。经过2年多的优化研究, 文献[12]报道了转换效率为4.57%的肖特基PbSe量子点太阳能电池, 如图1所示。

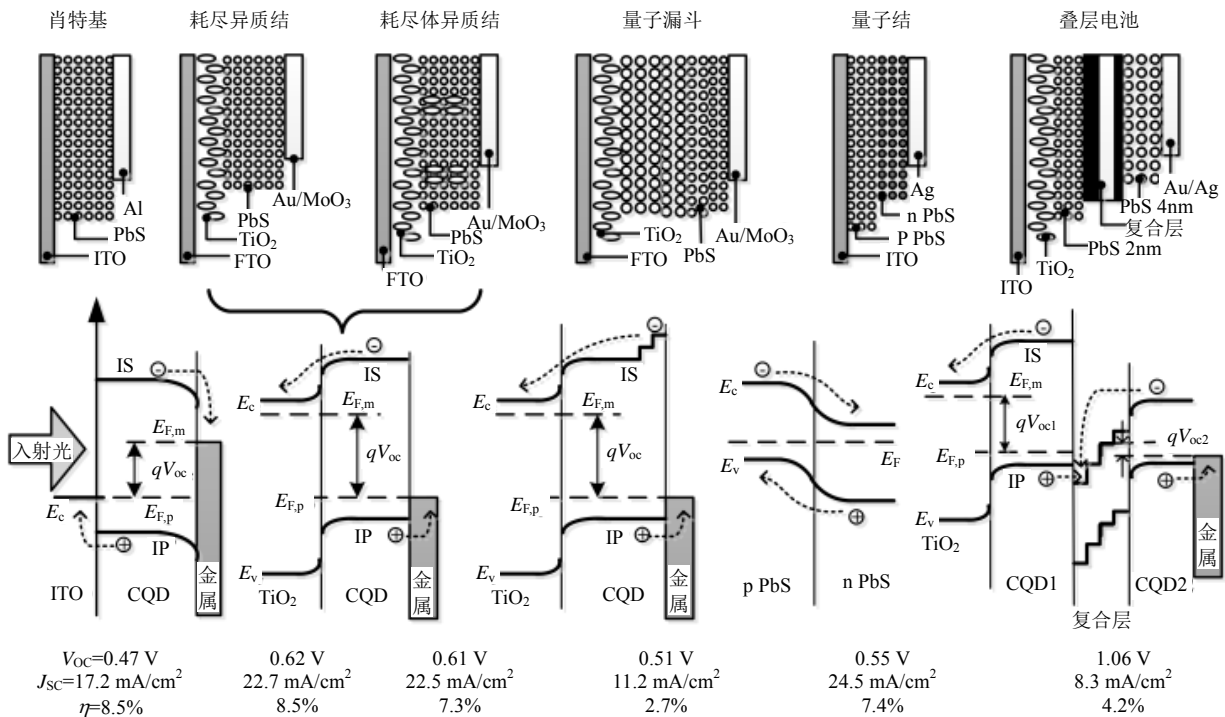


图1 各种量子点太阳能电池结构和能带结构图

肖特基器件制作简单, 但其转换效率受到以下因素的影响: 1) 光从透明ITO电极入射后被PbS CQD薄膜吸收产生电子-空穴对, 电子被背面的铝电极收集, 需要通过几乎整个CQD薄膜厚度, 而在运输过程中, 这些载流子很容易与空穴发生复合; 2) 典型的肖特基器件的势垒高度约为 $0.67E_g$, 然而

实际中, 开路电压一般会低于该值, 这是由在金-半接触界面的不完美钝化产生的缺陷能级所导致的“费米能级钉扎效应”造成的^[20]。

3.2 耗尽异质结电池

为了克服肖特基结构的这两个主要缺陷, 研制了基于PbS CQD材料的耗尽异质结电池。如果要有

效分离光生载流子, 需要将施主材料(p型)和受主材料(n型)结合在一起形成一个反型异质结, 如图1所示, 将p型PbS CQD薄膜通过逐层涂覆的方式旋涂于n型透明电子接收层上(要求材料具有宽带隙, 一般采用TiO₂或ZnO), 形成反型异质结。PbS的最低电子激发态能级远在TiO₂的导带底位置以上(>0.3 eV), 使得PbS中产生的电子能够很容易注入到TiO₂中, 而PbS的1P空穴能级远远高于TiO₂的价带顶, 形成了一个很高的势垒, 封锁了空穴从p区到n区的通路。电池背部的欧姆接触也很重要, 为有效实现空穴的提取, 要求金属电极具有深的功函数。研究显示将重掺杂氧化物MoO₃用作具有深功函数的接触材料与金属银结合使用做为空穴电极, 取得了不错的效果, 这样避免了使用贵金属金, 并保护CQD薄膜不受频繁的金属沉积的影响^[45]。

文献[12]报道的第一个PbS CQD DH太阳能电池效率为5.1%, $V_{oc}=0.51$ V, $J_{sc}=16.2$ mA/cm²^[13]。2013年, 通过优化结构(调整FTO电极和TiO₂的厚度, 使CQD薄膜端的耗尽区变宽)和材料特性(在处理CQD薄膜时采用更短的配位键, 使量子点间距变小, 增强量子点间电子波函数的耦合度), 第一次使单结量子点太阳能电池器件在非聚焦光照下达到了8.5%的转化效率^[3]。

前面已经提到, CQD的能带结构由量子点的尺寸决定, 当DH电池器件中所用CQD量子点尺寸较大时, 具有小带隙, 会使p区与n区的导带差异变小, 使电子向TiO₂的注入困难, 降低短路电流密度。研究发现, 在PbS量子点带隙 ≥ 0.9 eV, 即量子点尺寸不大于5.5 nm时, 电子的注入不受影响^[13]。另一方面, 减小导带的差异, 可以增大PbS和TiO₂的费米能级之差, 提高开路电压。通过调整TiO₂电子接收层的亲和势和PbS的尺寸, 优化异质结两侧的导带位置差异, 可以提高器件的主要参数, 使电池性能得到提升。

DH结构在3方面克服了肖特基结构的限制:

- 1) DH结构采用透明电子接收层TiO₂, 因为异质结在光入射端, 电子不必运动太远的距离, 降低了中途复合的概率, 从而能够更有效地被提取出来;
- 2) TiO₂-CQD交界面由于在溶液沉积过程中受到更好的钝化处理, 开路电压不受影响;
- 3) 由于异质结两边价带位置差异大以及TiO₂一侧的低电子浓度, 使得并联电阻 R_{sh} 增大, 从而提高了FF和电池效率。

3.3 耗尽体异质结电池

由于量子尺寸效应和量子限制作用, CQD薄膜

中电子(少子)的扩散长度很短, 限制了电池的转换效率。解决这个问题除了通过提高薄膜的电子输运能力, 还可通过改进器件的结构来实现。DBH CQD太阳能电池, 如图1所示, 采用将TiO₂孔浸润到PbS CQD薄膜中的结构, 使耗尽区扩展深入到光子吸收层更深的位置。该结构中电子被深入到PbS CQD材料中的垂直TiO₂电子接收极收集, 使得原DH结构中在远离异质结位置产生的电子被更有效地收集, 这有利于电池采用更厚的CQD薄膜来增加吸收。

由于内部交界面的面积增加, DBH比DH器件更容易发生载流子复合。通过调节TiO₂的能带结构, 可以得到目标导带偏移量, 抑制复合, 这种情况使得DBH结构的开路电压稍小于DH电池。

文献[14]的DBH结构电池的转换效率为5.5%, $V_{oc}=0.48$ V, $J_{sc}=20.6$ mA/cm², 通过对浸润电子接收层结构的优化, 文献[46]的DBH电池的转换效率达7.3%, $J_{sc}=22.5$ mA/cm²。

3.4 量子漏斗电池

当量子点直径在3~5 nm的范围内时, 材料对应的导带位置可以改变几个meV, 而价带位置基本不变^[9]。另外研究显示, 在一个含有不同尺寸CQD的薄膜中, 光致发光辐射出的光子能量与最小带隙相吻合^[47]。基于这种性质, 人们研制了一种量子漏斗太阳能电池^[15], 在该电池中通过逐层涂覆的方式沉积不同尺寸的CQD薄膜, 令靠近TiO₂层的CQD所含量子点尺寸最大, 在涂层过程中逐渐使用小尺寸的CQD溶液一层层堆叠形成光吸收层。该结构使得CQD薄膜中形成了一个内建导带梯度, 增加电子提取的驱动力, 选择性地引导电子到达电子接收层, 帮助准中性区域中的电子能够被有效收集。通过仿真和实验结果, 研究人员发现放置量子漏斗的位置应该在耗尽区内(短路情况下), 而不是在耗尽区边缘, 这样才能发挥量子漏斗的优点。优化的量子漏斗太阳能电池相比于普通的DH结构电池并没有获得更高的 J_{sc} , 但是具有了更高的填充因子。关于这种结构电池的研究较少, 电池的效率仅为2.7%。

这种结构利用量子点的能带工程以及小量子点中(禁带宽度大)的电子倾向于向大量子点中(禁带宽度小)运动的特点, 克服了量子点材料电子迁移率低和载流子扩散距离短的限制。在相同制备条件和测试环境下, 量子漏斗电池要比DH电池具有更高的填充因子和转换效率。

3.5 量子结电池

虽然DH等结构的器件解决了很多早期的问题,

但电池的开路电压还没有达到最大值,而且当采用不同尺寸的CQD薄膜时,需要重新考虑电子接收层的能带结构。为了解决这一问题可以在结两边分别采用n型和p型PbS CQD材料,形成量子结太阳能电池^[16]。通过在CQD表面或晶格内部掺入杂质控制CQD薄膜的掺杂情况,也可以通过选择表面配位键或暴露在气体中来控制PbS CQD的n型或p型^[48]。N型量子点薄膜的研制成功奠定了实现P-N结型电池结构的基础,并且结两边都能够通过调节量子点尺寸得到相同的或不同的禁带宽度。在量子结电池中 V_{oc} 与量子点薄膜的禁带宽度呈线性关系^[49]。

通过优化器件的电极,改进PbS量子点掺杂状况和PbS薄膜表面钝化情况,研制出效率为6.1%的P-N结型量子结电池^[50]。目前报道的该种电池的最高效率为7.4%^[16],采用 P^+-N-N^+ 梯度掺杂的结构。

3.6 叠层电池

前面讨论的都是优化电池的结构和提高CQD薄膜材料的性能,使CQD太阳能电池的转换效率尽可能接近单结电池的理论极限30%,叠层和多结电池的理论极限效率分别为42%和49%。量子点尺寸调谐带隙的性质,使CQD材料成为多结太阳能电池的理想材料。文献[17]中的PbS CQD叠层结构的太阳能电池,由两个电池单元和连接两者的复合层组成,该电池仅仅依靠量子尺寸调谐实现了选择性收获太阳光谱。前部单元为可见光吸收单元,所含PbS CQD直径为2 nm,后部单元为红外光吸收单元,所含量子点直径为4 nm。两个单元均采用DH结构,在将其堆叠成一个电池时,前部单元的透明电极和后部单元的透明电极被一个透明的复合层替代。该复合层从前到后依次由具有深功函数的n型 MoO_3 、ITO电极、具有浅功函数的重掺杂铝ZnO及另一层 TiO_2 组成,功能是使底部电池产生的空穴与顶部电池产生的电子复合,保持整个器件的电中性并且使前后部电流匹配。因为这两个单元是串联的,堆叠器件中的输出电流等于每个组成单元的电流,而输出电压是各单元之和。叠层(多层)电池的优点是利用量子点的尺寸调谐效应,可以在一个电池单元中实现对多个波长太阳光的有效吸收,在理论上能突破单层结构的转换效率,而这些需要建立在有良好的复合层连接各有源层的基础上,该复合层必须能够使前后单元的电流匹配,这就增加了电池结构设计的难度。另一方面叠层电池的开路电压为前后部单元的叠加,但是短路电流较小,与各层中最小的短路电流相当。前部单元DH电池的开路电压为0.7 V,后部单

元的开路电压为0.39 V,报道的叠层电池 V_{oc} 约为1.06 V,电池效率为4.2%。

从肖特基结构到耗尽体异质结结构,是随着研究的深入逐渐优化的结构,目前关于量子点电池的研究主要采用DH和DBH结构。而后3种结构的电池则是利用量子点材料的独特性质,人们开展的各种电池结构的研究尝试,相关方面的实验报道都比较少,还没有太多深入的研究。

4 总结与展望

近十年,基于PbS CQD材料的第三代薄膜太阳能电池发展迅速,这种器件发展的主要挑战是如何进一步提高器件的效率。首先,CQD薄膜的光电性质限制了电池器件的性能,可以通过加强量子点间的耦合度来提高电子空穴的迁移率,同时研究更好的钝化方法来尽可能减少禁带中复合中心的浓度,从而降低复合率;另外,更精确的激子输运模型的建立,能够为材料性能的优化指引方向。其次,器件结构的优化已经展示了其对电池性能提升的重要作用,通过优化DBH结构中的电子收集纳米电极,可以优化电子收集效率。这些研究结果显示,CQD太阳能电池还有很大的发展空间,并且亟待解决的能源污染与能源紧缺问题,也推动着该技术的不断前进。

参 考 文 献

- [1] KRAMER I J, SARGEN E H. Colloidal quantum dot photovoltaics: a path forward[J]. ACS Nano, 2011, 5(11): 8506-8514.
- [2] SARGEN E H. Colloidal quantum dot solar cells[J]. Nature Photonics, 2012, 6(33): 133-135.
- [3] MARAGHECHI P, LABELLE A J, KIRMANI A R, et al. The donor-supply electrode enhances performance in colloidal quantum dot solar cells[J]. ACS Nano, 2013, 7(7): 6111-6116.
- [4] 王占国, 陈涌海, 叶小玲, 等. 纳米半导体技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
WANG Zhan-guo, CHEN Yong-hai, YE Xiao-ling, et al. Nanometer semiconductor technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [5] 汤乃云, 陈效双, 陆卫. 尺寸分布对量子点激发态发光性质的影响[J]. 物理学报, 2005, 54(12): 345-350.
TANG Nai-yun, CHEN Xiao-shuang, LU Wei. Size-dependent emission properties of excited states in quantum dots[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(12): 345-350.
- [6] KANG M S, SAHU A, NORRIS D J, et al. Size-and temperature-dependent charge transport in PbSe nanocrystal thin films[J]. Nano Lett, 2011, 11(9): 3887-3892.
- [7] CHEN Y, YU D, LI B, et al. Size-dependent radiative

- emission of PbS quantum dots embedded in Nafion membrane[J]. *Appl Phys B*, 2009, 95(1): 173-177.
- [8] TALAPIN D V, LEE J S, KOVALENKO M V, et al. Prospects of colloidal nanocrystals for electronic and optoelectronic applications[J]. *Chem Rev*, 2010, 110(1): 389-458.
- [9] BRUS L E. A simple model for the ionization potential, electron affinity, and aqueous redox potentials of small semiconductor crystallites[J]. *J Chem Phys*, 1983, 79(11): 5566-5571.
- [10] BRUS L E. Electron-electron and electron-hole interactions in small semiconductor crystallites: the size dependence of the lowest excited electronic state[J]. *J Chem Phys*, 1984, 80(9): 4403-4409.
- [11] HINES M A, SCHOLLES G D. Colloidal PbS nanocrystals with size-tunable near-infrared emission: Observation of post-synthesis self-narrowing of the particle size distribution[J]. *Adv Mater*, 2003, 15(21): 1844-1849.
- [12] MA W, SWISHER S L, EWERS T, et al. Photovoltaic performance of ultrasmall PbSe quantum dots[J]. *ACS Nano*, 2011, 5(10): 8140-8147.
- [13] PATTANTYUS-ABRAHAM A G, KRAMER I J, BARKHOUSE A R, et al. Depleted-heterojunction colloidal quantum dot solar cells[J]. *ACS Nano*, 2010, 4(6): 3374-3380.
- [14] BARKHOUSE D A R, DEBNATH R, KRAMER I J, et al. Depleted bulk heterojunction colloidal quantum dot photovoltaics[J]. *Adv Mater*, 2011, 23(28): 3134-3138.
- [15] KRAMER I J, LEVINA L, DEBNATH R, et al. Solar cells using quantum funnels[J]. *Nano Lett*, 2011, 11(9): 3701-3706.
- [16] NING Z, ZHITOMIRSKY D, ADINOLFI V, et al. Graded doping for enhanced colloidal quantum dot photovoltaics[J]. *Adv Mater*, 2013, 25(12): 1719-1723.
- [17] WANG X, KOLEILAT G I, TANG J, et al. Tandem colloidal quantum dot solar cells employing a graded recombination layer[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(8): 480-484.
- [18] SARGENT E H. Infrared photovoltaics made by solution processing[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(6): 325-331.
- [19] MCDONALD S A, KONSTANTATOS G, ZHANG S. Solution-processed PbS quantum dot infrared photodetectors and photovoltaics[J]. *Nature Materials*, 2005, 4(2): 138-142.
- [20] TANG J, SARGENT E H. Infrared colloidal quantum dots for photovoltaics: Fundamentals and recent progress[J]. *Adv Mater*, 2011, 23(1): 12-29.
- [21] 任驹, 郭文阁, 郑建邦. 基于P-N结的太阳能电池伏安特性的分析与模拟[J]. *光子学报*, 2006, 35(2): 171-174.
REN Ju, GUO Wen-ge, ZHENG Jian-bang. Analysis and simulation of solar cells' V-A properties based on P-N junction[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(2): 171-174.
- [22] MOTT N F. Localized states in a pseudogap and near extremities of conduction and valence bands[J]. *Philos Mag*, 1969, 19(160): 835-852.
- [23] EFROS A L, SHKLOVSKII B I. Coulomb gap and low temperature conductivity of disordered systems[J]. *J Phys C: Solid State Phys*, 1975, 8(4): L49.
- [24] YU P, NEDELJKOVIC J M, AHRENKIEL P A. Electronic coupling in InP nanoparticle arrays[J]. *Nano Lett*, 2003, 3(12): 169.
- [25] ROMERO H E, DRNDIC M. Coulomb blockade and hopping conduction in PbSe quantum dots[J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 95(15): 156801.
- [26] LEATHERDALE C A, KAGAN C R, MORGAN N Y, et al. Photoconductivity in CdSe quantum dot solids[J]. *Phys Rev B*, 2000, 62(4): 2669-2680.
- [27] KOLEILAT G I. Efficient, stable infrared photovoltaics based on solution-cast colloidal quantum dots[J]. *ACS Nano*, 2008, 2(5): 833-840.
- [28] ZHITOMIRSKY D, KRAMER I J, LABELLE A J, et al. Colloidal quantum dot photovoltaics: the effect of polydispersity[J]. *Nano Lett*, 2012, 12(2): 1007-1012.
- [29] LU W, FANG J, STOKES K L, et al. Shape evolution and self assembly of monodisperse PbTe nanocrystals[J]. *J Am Chem Soc*, 2004, 126(39): 11798-11799.
- [30] CLARK S W, HARBOLD J M, WISE F W. Resonant energy transfer in PbS quantum dots[J]. *J Phys Chem*, 2007, C111(20): 7302-7305.
- [31] KONSTANTATOS G, SARGENT E H. PbS colloidal quantum dot photoconductive photodetectors: Transport, traps, and gain[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 91(17): 173505.
- [32] GAO J, JOHNSON J C. Charge trapping in bright and dark states of coupled PbS quantum dot films[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(4): 3292-3303.
- [33] IP A H, THON S M, HOOGLAND S, et al. Hybrid passivated colloidal quantum dot solids[J]. *Nature Nanotechnology*, 2012, 7(9): 577-582.
- [34] TANG J, KEMP K W, HOOGLAND S, et al. Colloidal-quantum-dot photovoltaics using atomic-ligand passivation[J]. *Nature Materials*, 2011, 10(10): 765-771.
- [35] GRAETZEL M, MITZI D B, SARGENT E H. Materials interface engineering for solution-processed photovoltaics [J]. *Nature*, 2012, 488(7411): 304-312.
- [36] KEMP K W, LABELLE A J, THON S M, et al. Interface recombination in depleted heterojunction photovoltaics based on colloidal quantum dots[J]. *Adv Energy Mater*, 2013, 3(7): 917-922.
- [37] LIFSHITZ E, SIROTA M, PORTEANU H. Continuous and time-resolved photoluminescence study of lead sulfide nanocrystals, embedded in polymer film[J]. *J Crystal Growth*, 1999, 196(1): 126-134.
- [38] ISTRATE E, HOOGLAND S, SUKHOVATKIN V, et al. Carrier relaxation dynamics in lead sulfide colloidal quantum dots[J]. *J Phys Chem B*, 2008, 112(10): 2757-2760.
- [39] GAPONENKO M S, LUTICH A A, TOLSTIK N A, et al. Temperature-dependent photoluminescence of PbS quantum dots in glass: Evidence of exciton state splitting and carrier trapping[J]. *Phys Rev B*, 2010, 82(12): 125320.
- [40] PETERSON J J, KRAUSE T D. Fluorescence spectroscopy of single lead sulfide quantum dots[J]. *Nano Lett*, 2006, 6(3): 510-514.
- [41] MANDELIS A, BATISTA J, SHAUGHNESSY D. Infrared

- photocurrent radiometry of semiconductors: Physical principles, quantitative depth profilometry, and scanning imaging of deep subsurface electronic defects[J]. *Phys Rev B*, 2003, 67(3): 205208.
- [42] 刘显明, 李斌成, 张希仁. 离子注入剂量的光载流子辐射测量技术研究[C]//远东无损检测新技术论坛论文集. 南京: 远东无损检测新技术论坛, 2008: 417-420.
LIU Xian-ming, LI Bin-cheng, ZHANG Xi-ren. Ion implantation dose dependence of photocurrent radiometry[C]//Proceedings of Far East Nondestructive Detection of New Technology Forum, 2008: 417-420.
- [43] WANG J, MANDELIS A, MELNIKOV A, et al. Exciton lifetime broadening and distribution profiles of PbS colloidal quantum dot thin films using frequency-and temperature-scanned photocurrent radiometry[J]. *J Phys Chem*, 2013, C117(44): 23333-23348.
- [44] JOHNSTON K W, PATTANTYUS-ABRAHAM A G, CLIFFORD J P, et al. Schottky-quantum dot photovoltaics for efficient infrared power conversion[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 92(15): 151115.
- [45] WANG X, KOLEILAT G I, FISCHER A, et al. Enhanced open-circuit voltage in visible quantum dot photovoltaics by engineering of carrier-collecting electrodes[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2011, 3(10): 3792-3795.
- [46] LAN X, BAI J, MASALA S, et al. Self-assembled, nanowire network electrodes for depleted bulk heterojunction solar cells[J]. *Adv Mater*, 2013, 25(12): 1769-1773.
- [47] FRANZL T, KLAR T A, SCHIETINGER S, et al. Exciton recycling in graded gap nanocrystal structures[J]. *Nano Lett*, 2004, 4(9): 1599-1603.
- [48] ZHITOMIRSKY D, FURUKAWA M, TANG J, et al. N-type colloidal-quantum-dot solids for photovoltaics[J]. *Adv Mater*, 2012, 24(46): 6181-6185.
- [49] TANG J, LIU H, ZHITOMIRSKY D, et al. Quantum junction solar cells[J]. *Nano Lett*, 2012, 12(9): 4889-4894.
- [50] LIU H, ZHITOMIRSKY D, HOOGLAND S, et al. Systematic optimization of quantum junction colloidal quantum dot solar cells[J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 101(15): 151112.

编辑 漆蓉

(上接第298页)

- [6] 李保栋, 孔兰菊, 陆春生, 等. SaaS交付平台多租户数据管理模型研究[J]. *小型微型计算机系统*, 2012, 33(12): 2658-2663.
LI Bao-dong, KONG Lan-ju, LU Chun-sheng, et al. Research on multi-tenancy data management model for SaaS delivery platform[J]. 2012, 33(12): 2658-2663.
- [7] 孔兰菊, 李庆忠, 李晓娜. 一种SaaS交付平台的多租户数据迁移策略[J]. *计算机应用与软件*, 2011, 28(11): 52-56.
KONG Lan-ju, LI Qin-zhong, LI Xiao-na. A multi-tenancy data migration policy for saas delivery platform[J]. *Computer Applications and Software*, 2011, 28(11): 52-56.
- [8] 张坤, 李庆忠, 史玉良. 面向SaaS应用的数据组合隐私保护机制研究[J]. *计算机学报*, 2010, 33(11): 2044-2054.
ZHANG Kun, LI Qin-zhong, SHI Yu-liang. Research on data combination privacy preservation mechanism for SaaS[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2010, 33(11): 2044-2054.
- [9] 汤小丹, 梁红兵. 计算机操作系统[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.
TANG Xiao-dan, LIANG Hong-bing. Computer operation system[M]. Xi'an: Xi Dian University Publisher, 2007.
- [10] YOO Y S, LEE H, RYU Y, et al. Page replacement algorithms for nand flash memory storage[M]. Berlin: Springer, 2007.
- [11] SMITHA I K, REDDY A. Identifying long-term high-band-width at a router[C]//Proceedings of the 8th International Conference on High Performance Computing. Hyderabad, India: Springer, 2001: 361-371.
- [12] CHAI Wei-koong, HE Di-liang, IOANNIS P, et al. Cache“Less for More” in information-centric networks[C]//Proceedings of the 11th International IFIP TC 6 Conference on Networking. Prague, Gzech: Springer, 2012: 27-40.

编辑 黄莘