

# 光学与电子信息学院课程考查答题本

(2020 ——2021 学年第 1 学期)

课程名称           微电子技术前沿报告          

课程类别           ☐必修          ☒选修          

班    级           电子 1801          

学    号           U201813654          

姓    名           马笑天          

任课教师           曾祥斌          

提交日期   2021  年  1  月  1  日  

成绩：                                 

任课教师签名：

注：无任课老师签名成绩无效。

# 光伏发电的历史、现状与前景

马笑天

（华中科技大学，武汉 430074）

（2020 年 12 月 15 日开始撰稿；2021 年 1 月 1 日完稿）

本文系统地介绍了有关光伏发电的基本概念，历史、现状与前景，并以其中的核心组成部分——太阳能电池为重点，综述近期热门的钙钛矿太阳能电池的最新研究进展，辅助介绍了光伏系统的储能元件相关的最新科技进展。最后，文章讨论了光伏发电未来所面临的机遇与挑战。

**关键词：**光伏系统 太阳能电池 半导体 钙钛矿 未来

## 1 引言

太阳光伏系统，也称为光生伏特，简称光伏（Photovoltaics, PV），是指利用光伏半导体材料的光生伏特效应，将太阳能转化为直流电能的设施。光伏设施的核心是太阳能电池板。<sup>[1]</sup>太阳能电池实际上并非电池，这是翻译上的问题，原意为太阳能单元。<sup>[2]</sup>目前，用来发电的半导体材料主要有：单晶硅、多晶硅、非晶硅及碲化镉等。随着社会对于能源需求的日益增长和对生活环境质量要求的不断提升，人类将目光投向了可再生能源，其中太阳能发电以其零成本、潜在容量大、可利用程度高、清洁卫生等因素，发展尤为迅猛，世界各国都在不断扩大这种发电方式的占比。

一套完整的光伏系统的构成大致包括如下部分：太阳能板将阳光吸收和转化成直流电，转换器将直流电转换成交变电流，并固定安装、连接线缆，和其他电气设备共同构成一套工作系统。这套系统还有可能使用一套太阳能跟踪器来收集尽可能多的太阳能。（图 1）<sup>[3]</sup>

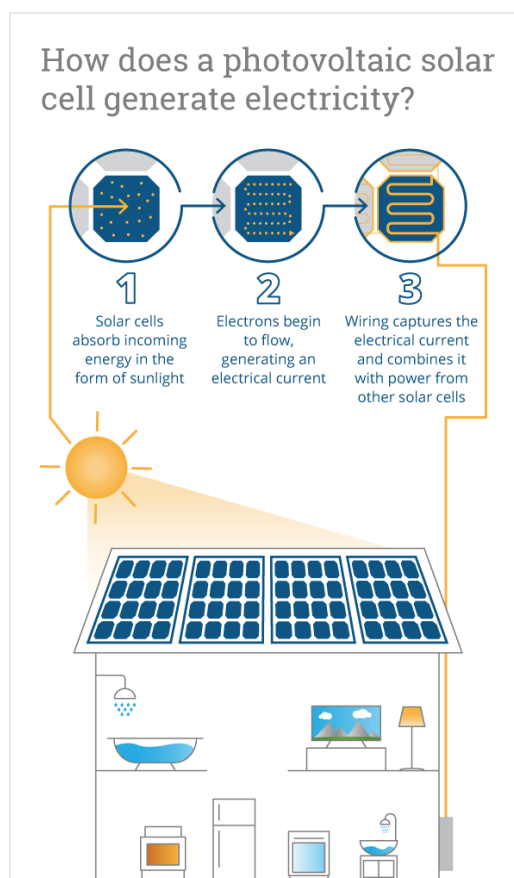


图 1 光伏发电系统简图

正如上文所提到的，太阳能（电池）板对于整个系统的效能起着至关重要的作用，故本文将以太太阳能电池的发展为主线，先介绍其发电原理，再综述其历史、现状与前景，重点突出对现阶段的新秀——钙钛矿太阳

能电池的前言科研成果报告，同时也会简单列举有关光伏系统其他组成部分的最新的科技进展，力求全面勾勒出光伏发电的轮廓。

## 2 光伏发电基本原理

太阳辐射，也称为太阳能或者光能，是一种由太阳所发出的电磁波。在某个特定地区，光伏发电的可行性和经济性依靠当地所能获得的太阳能资源。尽管地球表面上的任意一处在一年中都会有光照，但不同地点的辐照量会根据地理位置、季节、一天中的不同时间、当地的植被覆盖、当地的气候等因素而变化（图 2），下面进行定性说明：纬度越高的地方，光程在大气层中行进的路程就越长，被散射、折射的概率也越大，光的密度也有所下降，这也是早晚的太阳高度和中午的太阳高度所导致的辐照量差别的原因；纬度为  $40^\circ$  的地方，夏季辐照的能量大约是冬季辐照的 3 倍；在晴朗干燥的天气里，大气组分可以将原本的光束能量削弱 10%，而有厚云层时，则将完全被削减为零。

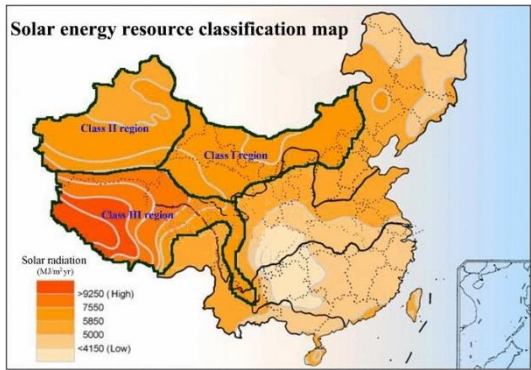


图 2 我国年均太阳能资源分布图

当这部分光线到达地面后，之所以能被太阳能电池吸收转化为电能，其背后所依靠的原理是半导体的光生伏特效应。

当用适当波长的光照射非均匀半导体（pn 结等）时，由于内建场的作用（不加外

电场），半导体内部产生电动势（光生电压）；如将 pn 结短路，则会出现电流（光生电流）。这种由内建场引起的光电效应，称为光生伏特效应。现简要分析 pn 结的光生伏特效应。

设入射光垂直于 pn 结面。如结较浅，光子将进入 pn 结区，甚至更深入到半导体内部。能量大于禁带宽度的光子，由本征吸收在结的两边产生电子-空穴对。在光激发下多数载流子浓度一般改变很小，而少数载流子浓度却变化很大，因此应主要研究光生少数载流子的运动。

由于 pn 结势垒区内存在较强的内建场（自 n 区指向 p 区），结两边的光生少数载流子受该场作用，各自向相反方向运动：p 区的电子穿过 pn 结进入 n 区，n 区的空穴进入 p 区，使 p 端电势升高，n 端电势降低，于是 pn 结两端形成了光生电动势，这就是 pn 结的光生伏特效应。由于光照产生的载流子各自向相反方向运动，从而在 pn 结内部形成自 n 区向 p 区的光生电流  $I_L$ ，如图 3 所示。由于光照在 pn 结两端产生光生电动势，相当于在 pn 结两端加正向电压  $V$ ，使势垒降低为  $qV_D - qV$ ，产生正向电流  $I_F$ 。在 pn 结开路情况下，光生电流和正向电流相等时，pn 结两端建立起稳定的电势差  $V_{oc}$ （p 区相对于 n 区是正的），这就是光电池的开路电压。如将 pn 结与外电路连通，只要光照不停止，就会有源源不断的电流通过电路，pn 结起了电源的作用。这就是光电池（也称光电二极管）的基本原理。

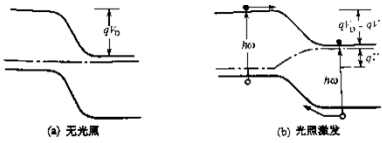


图 3 pn 结能带图

金属—半导体形成的肖特基势垒层也能产生光生伏特效应（肖特基光电二极管），其电子过程和pn结相类似<sup>[6]</sup>，不再赘述。

### 3 太阳能电池的发展历史与现状

术语“光生伏特”(Photovoltaics)一词，系 photo-（希腊语，意为光）与 volta（意为电气，纪念意大利物理学家亚历山德罗·伏特(Alessandro Volta)）的结合，意指由光产生电的现象，最早的记载可溯至十九世纪。

早在 1839 年，光生伏特效应第一次由法国物理学家 A. E. Becquerel 发现。1883 年 Charles Fritts 制造了第一块太阳能电池，他在硒半导体上覆上一层极薄的金形成半导体金属结，尽管该器件仅有 1% 的转化效率，但此乃太阳能发电的原型。1946 年 Russell Ohl 申请了现代太阳能电池的专利。随着各国研究人员对半导体物理性质的逐渐了解，以及加工技术的进步，在 1954 年美国贝尔实验室的研究员发现，在硅中掺入一定量的杂质，会使其对光更加敏感，并制作出了第一个有实际应用价值的太阳能电池。<sup>[2]</sup>

当今时代，太阳能光伏技术已经非常成熟，并且形成了一条完整的产业链，整体上可分为三个层次：上游产业是对以硅矿石和高纯度硅料的开采、提炼和生产为代表的原材料生产行业，包括了硅矿石开采与冶金硅提纯、多晶硅提纯、单晶/多晶硅片加工与切割等环节；中游产业是技术核心环节，设计各类专用设备的研发制造等，包括单晶/多晶硅电池片、电池组件生产与组装；下游产业是包括太阳能并网发电工程、太阳能电池组件的生产及安装、光伏集成建筑等在内的光伏产品系统集成与安装（图 4）。

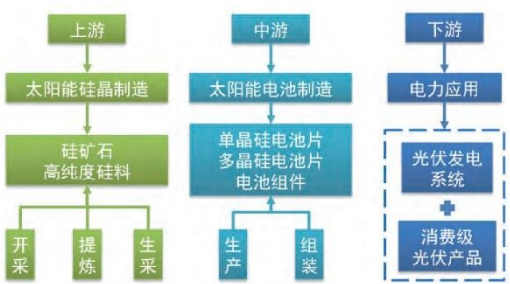


图 4 太阳能光伏产业链

尽管我国光伏太阳能产业在国内外市场的刺激下，产能迅速膨胀，但总体而言，我国的产业链发展仍极不均衡，一些关键技术，如晶体硅的生产仍然需要依赖他国进口。我国需要快速弥补产业链的不足，强基础，补短板，构建完整的产业链，这样才不会受制于人，被人“卡脖子”。<sup>[7]</sup>

### 4 太阳能电池中的“宠儿”——钙钛矿电池最新科技进展

如今，对太阳能电池的研究有多种方案，各有优劣，各类方案的最高效率详见附录图表。笔者在此仅对最近几年得到越来越多关注的钙钛矿电池进行有关报道。

桐荫横滨大学（Toin University of Yokohama）的 Tsutomu Myrasaka 教授课题组的长期经验和研究一直专注于低温溶液打印工艺的设计，用于制造染料敏化太阳能电池（dye-sensitized solar cells）和固态混合光伏电池（solid-state hybrid photovoltaic cells）。他在 2009 年利用有机铅卤化物（organo-lead halide compounds）作为吸光材料，研发光伏电池，这也就是钙钛矿太阳能电池（perovskite solar cells）<sup>[8]</sup>，截至本文完成时，该文献单篇被引次数超过了 12000 余次<sup>[9]</sup>！Miyasaka 对这一开拓性工作做出重要贡献，揭示了这一潜在的低成本、大面积、高效率的薄膜太阳能电池（thin film solar

cells) 的存在。

笔者查阅了国内外一些在钙钛矿电池领域的顶尖课题组近十年来的一些重大发现与突破, 列举如下。

牛津大学的 Henry J. Snaith 教授为可溶液处理太阳能电池 (solution-processed solar cells) 做出许多重大的研究突破, 包括第一次对染料太阳能电池 gyroid structured titania 性质的展示。在 2012 年, Snaith 发现了金属卤化物钙钛矿的光伏性质, 随后这便成为了光伏发电中的一片新领域。Snaith 同 Miyasaka 一起, 使用 spiro-OMeTAD 作为空穴导电层, 并将它沉积在混合的金属卤化物钙钛矿  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_2\text{Cl}$  之上。当课题组使用该材料和  $\text{TiO}_2$  共同制作电池时, 他们观测到的转换效率 (conversion efficiency) 接近 7.6%, 这与一年前的观测结果相近。然而, 当他们将  $\text{TiO}_2$  换为不导电的绝缘体  $\text{Al}_2\text{O}_3$  后, 这种电池竟然能提供近 11% 的转换效率。他们认为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  仅作为高比表面的支架 (high-surface-area scaffold), 但它却促使一层高质量钙钛矿晶体的形成。Snaith 小组认为这层膜的质量很有可能就是决定晶体可以如此高效的收集并转运电子的原因。<sup>[10]</sup>

2014 年, 加州大学洛杉矶分校 (University of California, Los Angeles) 的杨阳 (Yang Yang) 教授又一次将太阳能电池的效率提升。他的课题组通过理论功率转换效率 (Power Conversion Efficiency, PCE) 来调控整个器件的载流子动力学。通过控制钙钛矿层的形成, 以及精心选择其它的材料, 研究人员抑制了载流子在吸收体中的复合, 促进载流子注入到输运层, 并在电极上保持了良好的载流子抽取。当通过反向偏压扫描 (reverse bias scan) 时, PCE 电池的效率平均被提升至 16.6%, 最高的效率在没有抗反

射涂层的情况下大约达到了 19.3%。其制作过程在空气以及低温溶液中进行, 这也使得大规模制造得到简化, 有助于降低价格, 提高性能。<sup>[11]</sup>

在 2017 年, 钙钛矿电池的功率转换效率已经达到了 22%, 器件稳定性也达到了数千小时, 但是大规模制造仍然面临挑战。上海交通大学的韩礼元教授团队给出了一种制备太阳能电池薄膜的方法, 能生长出几乎没有缺陷的同质薄膜, 创造了  $36\text{cm}^2$  甲基铵卤化铅薄膜 (methyammonium lead halide film) 太阳能模块 12.6% 的效率纪录。<sup>[12]</sup> 随后, 斯坦福大学 Michael D. McGehee 团队在 Nature Energy 上发表的文章, 使得改进后的单片钙钛矿/硅串联的  $1\text{cm}^2$  太阳能电池达到 23.6% 的转换效率。<sup>[13]</sup>

2018 年, 武汉理工大学程一兵院士团队面对钙钛矿电池商用化批量生产所遇到的挑战, 采用体积扩展 (volum expansion) 的方法, 将实验室级别的微型电池扩展到大尺寸钙钛矿电池模组 (perovskite solar module, PSM), 而功率转换效率仅下降了 8%, 为 13.98%, 且电极在 30 天内仍有 90% 的保留。<sup>[14]</sup>

可以看出, 钙钛矿电池自发现至今不过十余年, 但是其发电效率提速之快仍不容小觑。据笔者所知, 截至收稿时, 目前有报导的最高效率的钙钛矿电池<sup>[15]</sup>是由香港城市大学 (City University of Hong Kong) / 华盛顿大学 (University of Washington) 创造的, 为 25.5% (图 5)。尽管钙钛矿电池前景光明, 但是它仍然面临着众多问题, 如组分中的有害物质, 寿命短, 成本高不适合大批量生产等等。这些都是以后需着手解决的问题。





图 5 效率为 25.5% 的钙钛矿电池

## 5 光伏系统其他组成部分的最新科技进展

正如引言部分所说，太阳能电池只产生电能，并不存储能量，实则为一个获取太阳能的小单元。我们的电气系统最初的设计即为提供瞬时电源，存储容量基本上为零。所以产生的能量如何高效的存储，这便是随之而来的问题。如果无法解决这个问题，就无法构成大规模的清洁电网，那么我们便无法高效地获得清洁能源。<sup>[16]</sup>

过去 30 年来，锂离子电池因其具有的重量轻、密度高、充电速度快等性质，在技术领域（尤其是在移动计算领域）代表着一股不可阻挡的力量。然而，尽管锂离子电池很好，但其也有弱点，例如对于极端温度很敏感，需要精细的电源周期管理，价格仍然高昂等等。斯坦福大学的崔屹（Yi Cui）教授是锂电池以及清洁能源领域的著名学者，他所创办的 EnerVenue 公司发现了一种用廉价而丰富的金属合金代替航空电池中贵金属的方法，使得镍氢电池技术可能会在不久的将来下放至大规模商用。镍氢电池具有非常显著的优势：对温度与循环次数有极大提升，安全可控，组成物质对环境友好，免维修等等。据估算，如果采用这种技术，一度电将低至 1 美分，维护零成本，使用寿命高达 30 年！<sup>[17]</sup>

## 6 光伏发电未来可能会遇到的一些机遇与挑战

不可否认，未来是电动的。以美国为例，总的来看，光伏发电目前仅为国家电网很小的一部分，但是其比重会越来越大（图 6）。所有未来的技术创新需要经过大幅改进、战略性重新设计和翻新的电网系统，光伏发电极有可能是人类社会对于清洁能源需求的最佳候选人。

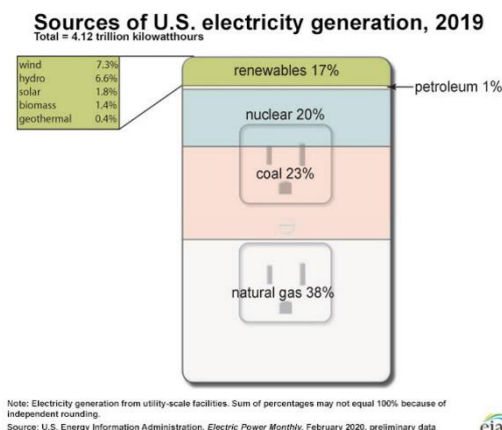


图 6 2019 年美国各类发电方式占总电能比重

就我国情况来看，在太阳能光伏产业的上游，我们做得并不出色。根据曾老师在课上的报告，在制作太阳能电池的原材料单晶硅方面，我们仍需进口国外的高纯度原材料，而我国所制造的纯度和国外相比差了三个数量级以上。作为太阳能电池的“命根子”，原材料这一关我们就极易被一些发达国家“卡脖子”。作为电子专业的学生，电子材料的制备是我们的强项，笔者认为这也有可能成为自己深造时所探索的项目。

在太阳能电池板的中游——商用制备方面，我国是世界上最大的制造国，也是最大的出口国，这一部分体系较为成熟，略去不表。但是在太阳能电池板的研发，尤其是对于新型电池原创性的工作，我国的学术界创新能力不足，大多停留在对于国外提出概念的模仿与改良，这是我们的短板，但是短

期内也无法改变,只能通过长期的教学改革与思维革新才能使我国从科创大国迈向科创强国。

在最后的送电入户的阶段,得益于国家的大力补贴,尽管现阶段光伏发电的成本仍然高于火力发电,但在中国的家庭与工厂,已经有一部分电能是从太阳能转化而来,价格却没有提高。我国的电网既需要解决南北跨度所导致的温差问题,也需要解决高海拔、地广人稀的草原等地区的零散分布的电力供给,这使得太阳能供电的优势大大体现,并被广泛用于西北等地广人稀的地区。

最后,整体来看,如果一个国家的光伏发电网要继续保持优势,有三个领域迫切需要改革:

集中的、有远见的战略规划

更好的监测和协调技术

更好的发电、存储和传输技术<sup>[18]</sup>

其中的每一项都缺一不可,否则木桶效应终将显现。作为光电学院的学生,我们可能更加关心的是如何更好的发电、存储和传输技术,但是如果对于整个光伏发电产业的发展蓝图有所期许,上述的另外两条因素也值得我们付出同样的精力来思考。

## 7 总结

本文在力图为读者呈现出当下光伏发电的前沿进展时,仍然将一些背景资料(如光伏发电历史、原理等)大致进行说明,并在最后结合课程内容与自身体悟,为读者展现出未来光伏发电正在面临的问题,以及我国可以抓住的机遇。

## 参考文献

- [1]<https://zh.wikipedia.org/wiki/太阳能光伏>
- [2]<https://zh.wikipedia.org/wiki/太阳能电池>
- [3][https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic\\_system](https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic_system)
- [4] M. A. Green, "Photovoltaics: coming of age," IEEE Conference on Photovoltaic Specialists, Kissimmee, FL, USA, 1990, pp. 1-8 vol.1.
- [5] Sze S. M. Physics of Semiconductor Devices. 2nd Edition. New York; John Wiley and Sons, 1981, Chap. 14
- [6] Pankove J. I. Optical Processes in Semiconductors. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1971
- [7] 王阳. 太阳能光伏产业技术分析报告[J]. 高科技与产业化, 2019 (07): 38-43.
- [8] Kojima, Akihiro, et al. "Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells." *Journal of the American Chemical Society* 131.17 (2009): 6050-6051.
- [9]<https://scholar.google.com/citations?user=esSUB4cAAAAJ&hl=en&oi=ao>
- [10] Lee, Michael M., et al. "Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal halide perovskites." *Science* 338.6107 (2012): 643-647.
- [11] Zhou, Huanping, et al. "Interface engineering of highly efficient perovskite solar cells." *Science* 345.6196 (2014): 542-546.
- [12] Chen, H., Ye, F., Tang, W. et al. A solvent- and vacuum-free route to large-area perovskite films for efficient solar modules. *Nature* 550, 92-95 (2017).
- [13] Bush, K., Palmstrom, A., Yu, Z. et al. 23.6%-efficient monolithic perovskite/silicon tandem solar cells with improved stability. *Nat Energy* 2, 17009 (2017).
- [14] Li, Kunpeng, et al. "Influence of hot spot

heating on stability of large size perovskite solar module with a power conversion efficiency of~ 14%." *ACS Applied Energy Materials* 1.8 (2018): 3565-3570.

[15] <https://www.rechargenews.com/solar/hong-kong-polyu-claims-perovskite-cell-leap-with-record-25-5-1-1-867329>

[16] <https://www.forbes.com/sites/erikkobayashisolomon/2020/11/19/grid-modernization-we-must-rebuild-our-innovation-engine/?sh=1a02dfd23b86>

[17] Yi Cui's Twitter

## 致谢

在这里，我要感谢《微电子技术前沿报告》中给我们开展讲座的缪向水教授、徐静平教授、何毓辉教授、曾祥斌教授、张道礼教授、王兴晟教授、雷鑑铭副教授等，他们将自己研究领域的背景知识以及最前沿的思想带给我们，让我受益匪浅。缪教授、何教授、王教授深耕忆阻器，为非冯诺依曼式的存算一体的次世代计算机提供技术支持；徐教授研究高 $\kappa$ 栅介质，使得CMOS的尺寸能继续不断缩小；曾教授为太阳能电池性能的改良做了十余年的研究；张教授专攻二维导电薄膜材料，改进器件的发光性能；雷教授则研究如何利用硬件数字电路加速人工智能的运算。他们精彩的讲解，让我对于微电子专业有了更深入的了解，这也为我将来继续深造时提供了更多的思考与方向。

我还要特别感谢曾祥斌老师，我有幸修学了他开设的《半导体器件物理》。在这门课中，他在知识点之间穿插了一些对于太阳能电池的理解，并且对比了他在工厂中看到的

[18] <https://www.forbes.com/sites/erikkobayashisolomon/2020/11/19/grid-modernization-we-must-rebuild-our-innovation-engine/?sh=1a02dfd23b86>

[19] <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

企业与高校之间研发的差别，例如，电阻在实际生产中是一卷一卷紧密地卷起来的，这点是我从来没有想到过的，给我留下了很深刻的印象。我在这篇报告的第6部分“光伏发电未来可能会遇到的一些机遇与挑战”中的一些观点便是从这门课上感悟而来，再次对他表示由衷的感谢！

最后，我很高兴本学期选修了这门为微电子同学开设的课程，让我对于学院内除去我所在的电子专业外的其他三专业之一有所了解。

本文写于二〇二〇岁末，终于二〇二一肇始，期间我花了大量时间调研国内外各种有关光伏发电的前沿技术，以及相关的地理科学、材料科学、金融市场等方面有关的知识，但这仍然不够全面，由于编者水平有限，加之成稿匆忙，本文中如有纰漏，敬请指正！

马笑天

二〇二一年元月一日

于华科东九楼



