

低成本实现22%效率： 大规模生产激光掺杂选择性发射极太阳能电池的前景

Matt Edwards,
澳大利亚新南威尔士大学光伏研究中心

此技术文章选自第十一期印刷版《Photovoltaics International》季刊

摘要：

新南威尔士大学(UNSW)所研发的激光掺杂选择性发射极(LDSE)专利技术制造成本低，电池效率高，且适合大规模批量生产，因此在光伏产业内引起了广泛的关注。目前实验室生产的小面积测试电池最高效率可达19.7% [1]，工业上使用156mm大面积硅片生产的电池效率可达19.0% [2]，因此该技术吸引了诸多商业合作伙伴。总共有近10家公司正在部署LDSE及其衍生技术，有些已投入生产，有些尚处于试生产阶段。本文将着重分析LDSE太阳能电池在大规模生产方面的潜力。

前言

新南威尔士大学的激光掺杂选择性发射极(LDSE)专利技术不断吸引着一批又一批的商业合作伙伴，其中一个原因便是制造商只需对现有的标准丝网印刷太阳能电池生产线进行小幅改造，便可实现LDSE技术的应用。仅需几台新增设备，制造商便可以实现选择性发射极，从而大幅度提高电池性能。市面上其它选择性发射极技术往往需要大量使用对准的丝网印刷技术，因此效率很难高于18.5% [3]，同时这些技术要用到昂贵的银、铝丝网印刷浆料。然而，新南威尔士大学的LDSE技术采用了自动对准快速电镀金属电极以及低成本、低温的激光掺杂和开窗技术，制造过程迅速便捷。这些技术包括：

- 将前表面遮荫损失降低至3%
- 可使金属栅线排列更加紧密，从而提高填充因子
- 明显提升了蓝光响应并将短路电流提高了10%
- 减少金属-硅接触面积，从而降低接触面的复合，提高电池电压
- 无需光学对准技术及由此造成的产量损失

这些太阳能电池前表面设计的改进将传统丝网印刷太阳能电池的绝对效率提高了至少1%，且降低制造成本。但LDSE技术最大的优势在于其为增强后表面设计所提供的发展空间。如果同时采用后表面钝化和点接触技术，标准p型Cz材料的电池效率有望在近两年内提高至21%甚至22%。同时，丝网印刷技术所需的浆料占丝网印刷

电池加工成本的三分之一，因此无论在效率上还是成本上都明显逊于LDSE技术。从而，LDSE太阳能电池的每瓦生产成本得到了大幅降低。

“新一代LDSE技术十分适合大规模生产，可以预见，采用LDSE技术，硅片、电池及组件方面的购置成本都可大幅降低。”

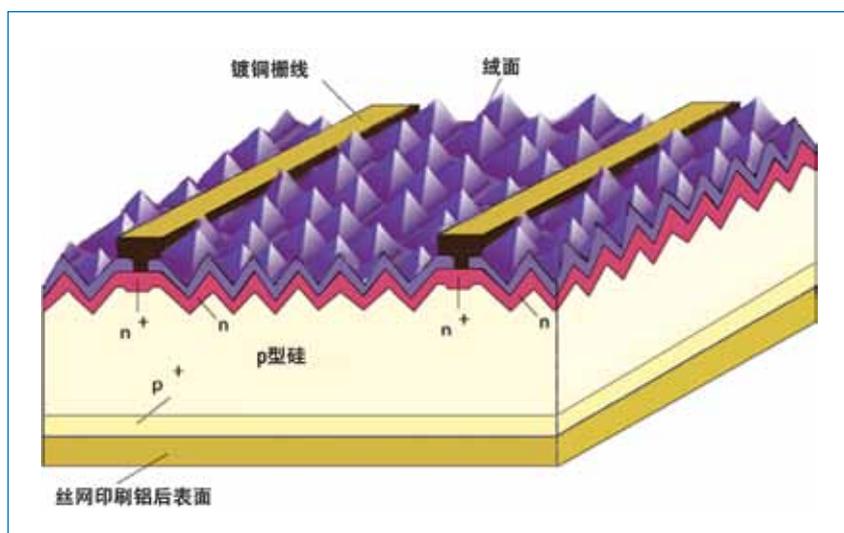
新南威尔士大学的PERL电池目前保持着硅基太阳能电池的效率记录，而新一代LDSE太阳能电池具备了PERL

结构的诸多特征，蓝光及红光的光谱响应特性都很出色，且开路电压在p型Cz硅材料上也可以轻松达到670mV，远高于丝网印刷方法制造的电池。然而与PERL结构不同的是，新一代LDSE技术十分适合大规模生产，而且可以预见，采用LDSE技术，硅片、电池及组件方面的购置成本都可大幅降低。

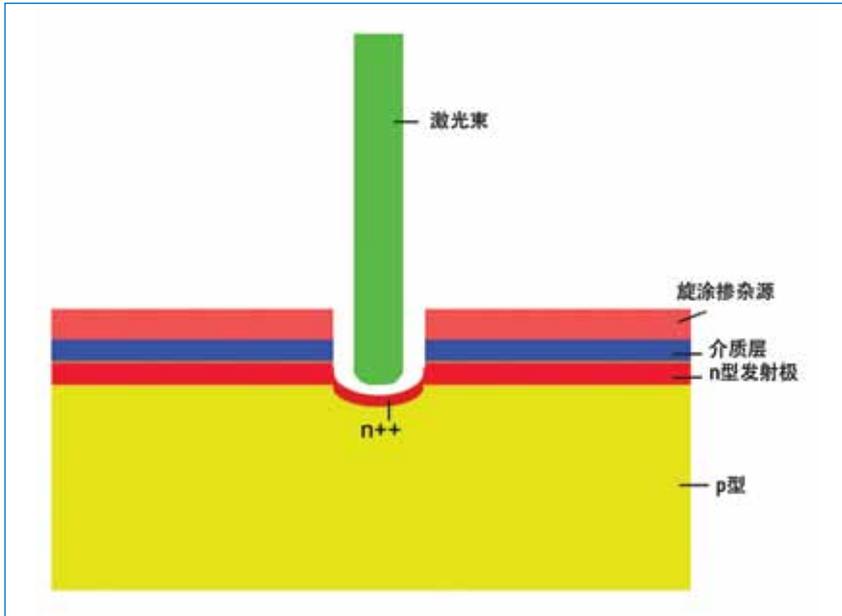
新南威尔士大学经过多年的研究，已经在LDSE领域拥有了一系列完善的专利技术，同时还利用LDSE技术开发出了一些衍生技术。

单面LDSE工艺

图一为标准单面LDSE电池的结构示意图。电池前表面的金属电极由快



图一：标准单面LDSE太阳能电池，正面采用激光掺杂选择性发射极结构，以及电镀金属电极设计，背面采用丝网印刷铝背电场结构。



图二：激光掺杂步骤。介质层被去除的同时，掺杂源被融化的硅材料吸收，同步形成了选择性发射极和电镀掩膜。

速光诱导电镀制得，而后表面则采用了标准的铝丝网印刷工艺。通过往带有氮化硅钝化层的硅片上涂布含磷掺杂剂，并用激光融化硅材料上表面，可以形成选择性发射极的重掺杂区域。图二为这一过程的示意图。在融化过程中，硅与磷掺杂源中的磷原子混合，再结晶后形成重掺杂区域。与此同时，在激光束划过的地方，氮化硅钝化层被击穿，由此形成的开口可作为自对准电镀的掩膜。

图三展示了LDSE太阳能电池制造所需的加工步骤。加工的前期步骤几乎与标准丝网印刷太阳能电池的制造流程相同。原材料硅片经过损伤刻

蚀和制绒后，进行 $200 \Omega/\text{sq}$ 的浅发射极掺杂。发射极的掺杂浓度分布和方块电阻并不十分关键。随后在边缘隔离刻蚀工序后紧接着进行PSG的去除工序，这两道工序可以在同一设备中完成，且均可采用背部湿法刻蚀的方法。之后，采用PECVD或溅射技术在硅片表面生长氮化硅层。

传统的丝网印刷电池在此之后将进行前表面银电极印刷，以及后表面银主栅线和后表面铝背电场的印刷和共烧。然而LDSE电池仅需印刷后表面银主栅和后表面铝背电场，并进行共烧。在后表面接触形成后，前表面经激光掺杂后进行电镀及电极烧结。

由于LDSE加工步骤与丝网印刷太阳能电池十分相似，只需添加掺杂剂涂布设备、激光器、电镀槽和烧结炉等设备，即可将现有的丝网印刷生产线改造成LDSE电池生产线。

光诱导电镀(LIP)过程包括快速电镀、烧结以及快速镀铜步骤，并加制极薄的银或锡封盖层以防止铜污染到组件密封层。与缓慢的传统化学镀层方法不同，光诱导电镀工艺仅耗时几秒钟，而镀铜工艺也只需要几分钟而已。新南威尔士大学研发的光诱导电镀技术可以形成很细的金属线，宽度仅为 $20\text{--}30$ 微米。如果加工步骤控制得当，窄栅线的高度可达 $15\text{--}20$ 微米，横截面几乎为半圆形，且附着性良好[2, 4, 5]。激光掺杂和电镀过程经过简单优化后，其金属线的剥离强度可达 $3N$ ，与丝网印刷电池不相上下。

最后，在制造组件时，LDSE电池可以根据组件制造商的需要采用导电粘合或焊接的方式联接。

单面LDSE制造成本分析

新南威尔士大学先进的激光掺杂和电镀技术可将前表面的遮荫损失从大约7%降低至3%，因此金属线可以排布得更加紧密，以降低发射极的电阻损失，从而提高填充因子、降低发射极掺杂浓度。轻掺杂的发射极大地提高了蓝光的光谱响应，并将短路电流提高了10%。与此同时，窄金属线降低了金属-硅接触面积，且由于优化后的激光掺杂浓度很高（方块电阻可达 $5 \Omega/\text{sq}$ ），接触面的暗饱和和电流损失降低，从而增加了电池电压。这一技术中不需要光学对准，也避免了由此造成的减产状况。由于上述的高效率特征，在工业生产环境下，使用p型Cz单晶硅材料生产的单面LDSE电池效率可达19.0%，使用p型多晶硅材料效率则可以达到17.5%；而标准丝网印刷技术在p型Cz材料和p型多晶硅上制造的电池效率分别为17.2%和16.0%。考虑到效率的提高，使用商业制造成本模型软件算出的LDSE电池制造成本与标准丝网印刷电池成本相当。制造成本模型假定生产线位于中国，硅片尺寸 $156 \times 156\text{mm}$ ，生产速率为每小时2400片电池，产率95%，设备综合效率87%。此外，这一模型还考虑了制造设备投资成本、土建设施和维护（沉没成本以及运营成本）、劳动力成本（间接和直接成本）、电费、工业气体消耗、去离子水和化学试剂的使用、用于LDSE工艺的金属电镀成本以及用于丝网印刷工艺的印刷浆料、丝网和清筛器费用。在单晶及多晶硅材料价格都在0.20美元/瓦左右时，LDSE技术的电池加工成本与标准丝网印刷电池相当。然而，由于LDSE技术效率更高，因此能量密度也相应提高，

	SP	LDSE
损伤腐蚀 & 制绒	✓	✓
扩散	✓	✓
去除PSG/边缘刻蚀	✓	✓
PECVD SiN_x	✓	✓
丝网印刷及干燥	正面网印银浆	×
	干燥	×
	背面网印银浆	背面网印银浆
	干燥	干燥
	背面网印铝浆	背面网印铝浆
链式烧结炉烘烤	✓	✓
涂源	×	✓
激光掺杂	×	✓
镍/铜/银 电镀	×	✓
镍烧结	×	✓
测试	✓	✓

图三：单面LDSE电池与标准丝网印刷电池的工序对比。LDSE技术只需额外的激光掺杂和电镀过程，且不需要前表面接触丝网印刷工序。

这大大降低了硅片及组件的每瓦加工成本，从而降低LDSE技术的总制造成本（单晶1.35美元/瓦，多晶1.40美元/瓦），这一数字低于传统丝网印刷技术的成本（单晶1.45美元/瓦，多晶1.50美元/瓦）。图四展示了两种技术的制造成本，同时LDSE技术的平衡系统部件(BOS)及安装成本仍有进一步下调的空间。

与目前市面上其它各类选择性发射极电池的设计相比，LDSE技术由于无需额外的光学对准系统而受到厂商的广泛欢迎，同时，由于高温处理步骤较少，LDSE技术还适用于多晶硅材料的加工。单面LDSE电池与传统丝网印刷太阳能电池技术相比拥有巨大的领先优势。然而，新的LDSE技术还可以进一步提高电池的性能并降低成本。测试表明，在标准p型Cz硅片上使用LDSE技术，并配合后表面钝化工艺制作的电池，其开路电压达到700mV，转换效率可达22%，这大大超过了网印技术的水平。从而实现除硅片、组件加工成本之外，在电池加工成本上的进一步下调。

双面激光掺杂选择性发射极工艺

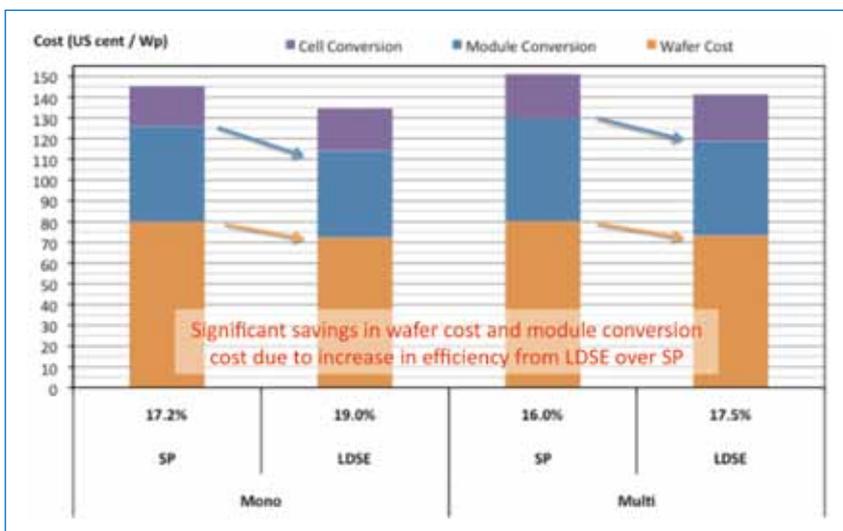
图五中展示的是双面激光掺杂选择性发射极(D-LDSE)电池结构示意图。该结构借鉴了许多由新南威尔士大学研发的、曾创下世界纪录的PERL电池的设计特点，并新增了许多新式背表面技术从而实现采用新技术实现的高质量背面钝化，局部选择性扩散和自对准点接触电极。除了上述优化后表面的设计外，该结构还具有常规LDSE电池的一些特征，包括前表面制绒和自对准电镀细金属电极等。

图六展示了D-LDSE太阳能电池的加工步骤。与单面LDSE电池相比，其主要不同在于背表面钝化层的制做是通过前、后表面同时进行激光掺杂来完成的，然后采用一些丝网印刷之外的工业技术加工电极。这样一来，D-LDSE电池的生产就完全不需要使用网印设备和昂贵的网印浆料。

“实际生产中，单面LDSE电池分别在p型Cz单晶硅材料和p型多晶硅材料上分别实现了19%和17.5%的电池效率”

双面LDSE电池的成本分析

除正面采用高质量LDSE技术外，双面LDSE电池背面的高效率设计特点也使电池效率一举突破了20%。凭借高



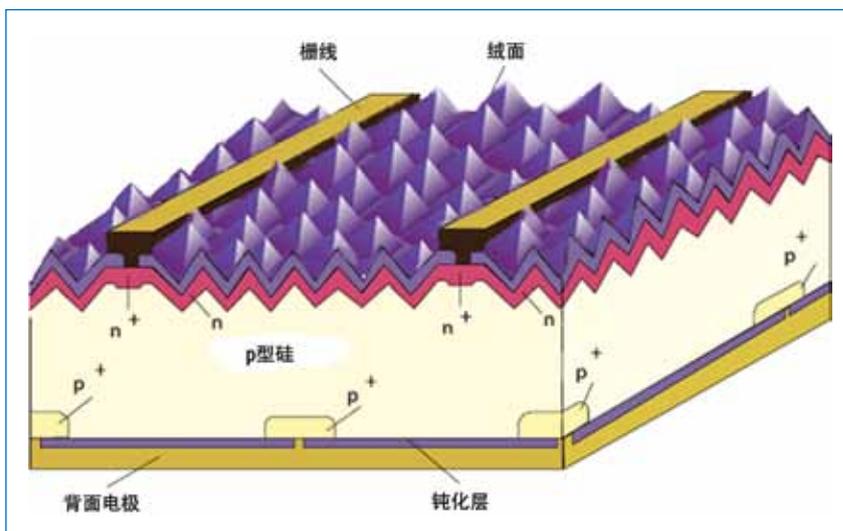
图四：LDSE太阳能电池与标准丝网印刷太阳能电池的总制造成本对比，由于能源密度提高导致硅片和组件加工成本降低。

质量背表面钝化层，可减少金属半导体交界区域的点接触面积，以及在点接触部分进行高浓度掺杂三种工艺的同时使用，即使是在p型Cz硅片上，也可大幅降低暗饱和电流，并将开路电压提高到700mV（试生产的电池开路电压可以轻易超过670mV），这大大超出了此前对此种材料研制LDSE电池效果的预料。背表面的优化设计还可以提高长波响应，进一步提高短路电流，几种工业化电极制作技术也有效地保证了较低的电阻损失。对于单面LDSE工艺而言，所有的技术都可以应用于工业化生产，并且不需要额外的光学对准设备，避免由此带来的产量降低。

受背面丝网印刷技术的限制，使用p型Cz单晶硅材料制作的单面LDSE电池效率能达到19%左右，而使用p型多晶硅材料则能达到17.5%，而使用这两种材料制作的D-LDSE电池效率却分

别可以达到21%和19%。相比之下，使用p型Cz单晶和多晶硅制作的标准丝网印刷电池的效率则仅为17.2%和16.0%。D-LDSE电池生产线仍假设建造在中国，产量为每小时2400片，选用156×156mm硅片，产率和设备综合效率分别达到95%和87%。通过使用商业成本建模软件进行分析，由于D-LDSE电池的效率较高，其成本已经可与丝网印刷太阳能电池相媲美。

图七对比了传统丝网印刷电池和D-LDSE电池的成本结构。虽然单面LDSE电池生产成本接近标准丝网印刷技术，但通过大幅降低硅片和组件成本，单晶D-LDSE电池每瓦成本可以降低到0.14美元（丝网印刷0.19美元/瓦），多晶D-LDSE电池0.15美元/瓦（丝网印刷0.21美元/瓦）。淘汰了丝网印刷工序和昂贵的网印浆料，以及提高单位面积输出功率是成本降低的主要原因。



图五：双面LDSE太阳能电池，正面采用激光掺杂选择性发射极结构，背面采用钝化、局部掺杂和点接触结构。

	SP	LDSE	D-LDSE
损伤刻蚀 & 制绒	✓	✓	✓
扩散	✓	✓	✓
去除PSG/边缘刻蚀	✓	✓	✓
PECVD SiN _x	✓	✓	✓
丝网印刷及干燥	正面网印银浆	×	×
	干燥	×	×
	背面网印银浆	背面网印银浆	×
	干燥	干燥	×
	背面网印铝浆	背面网印铝浆	×
链式烧结炉烘烤	✓	✓	×
涂源	×	✓	✓
激光掺杂	×	×	正面 & 背面
镍/铜/银 电镀	×	✓	✓
镍烧结	×	✓	✓
背面金属化	×	×	✓
测试	✓	✓	✓

图六：双面LDSE电池、单面LDSE电池与丝网印刷太阳能电池的工序对比。D-LDSE电池彻底摆脱了网印工艺，节省了网印浆料的成本。

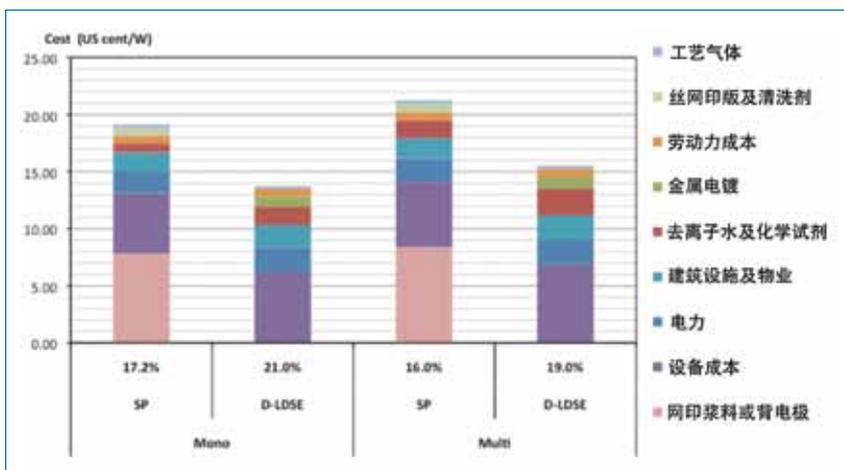
图八展示了D-LDSE技术在组件方面的总成本。由于D-LDSE电池拥有较高的能量密度，其硅片和组件的每瓦加工成本都可以进一步降低，其成本(单晶1.17美元/瓦，多晶1.23美元/瓦)已经远低于一般丝网印刷技术(单晶1.45美元/瓦，多晶1.51美元/瓦)及其他网印选择性发射极技术。D-LDSE技术还预计还可以降低系统和安装成本。

与传统丝网印刷太阳能电池技术相比，单面LDSE电池具有很大的竞争优势。然而更令人期待的则是效率高达22%的背面钝化的新型LDSE技术，可在除硅片和组件加工成本外的其他方面显著降低电池加工成本。

最后，与目前市面上的其他高效率太阳能电池设计相比，D-LDSE是极具吸引力的方案，因为这一技术既不需要昂贵的浮区材料(浮区材料: float zone feedstock)、透明导电氧化层或光刻开窗，同时又应用于多晶硅材料。

克服LDSE所面临的问题

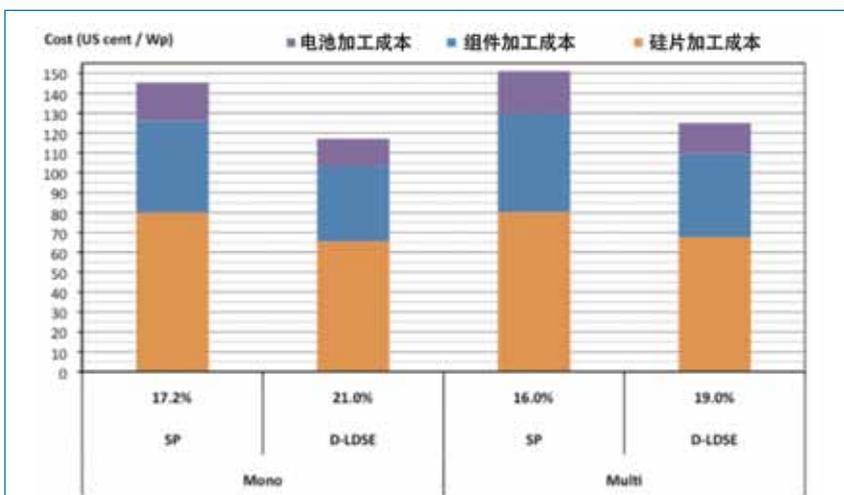
与任何一种新技术的诞生一样，LDSE在被人们广泛接受之前还有许多问题有待解决。在新南威尔士大学，我们已经花费了很多年评估并解决LDSE技术所带来的挑战。正如上文所提到的，LDSE的许多工艺步骤与一般丝网印刷技术相同，新引入的工艺只有激光掺杂和电镀。LDSE所面临的剩余问题也主要集中在为这两个工艺选择合适的设备并进行优化。许多研究报告曾指出使用纳秒级Q开关激光会带来表面损伤，这一问题可以通过选择合适的连续式激光器予以解决。新南威尔士大学在近几年中尝试使用过若干种激光源，并向其合作伙伴公布了合适的激光及其他设备的推荐型号。



图七：D-LDSE太阳能电池与一般丝网印刷太阳能电池的加工成本对比。由于D-LDSE技术拥有更高的效率且省去了网印工艺和网印浆料，其成本可大大节省。

“许多研究报告曾指出使用纳米级Q开关激光会带来表面损伤，这一问题可以通过选择合适的连续式激光器予以解决。”

为了获得连续的掺杂区域，激光掺杂速度也需进行优化，从而提高电镀质量，消除发射极分流。而且似乎激光走速也很容易提升进而达到缩短加工周期、提高大规模生产速度的目的。与此类似，电镀和烧结的条件也需要进行相应优化，从而使电极黏合更牢固，防止分流，并形成阻挡层有效防止铜的污染。值得高兴的是，优化后的烧结温度较低，电镀的时间较短也满足大规模生产的要求。



图八：D-LDSE太阳能电池与一般丝网印刷太阳能电池的总拥有成本对比，组件和硅片的每瓦加工成本将大幅降低。

在新南威尔士大学，我们经常会问及有关电镀可靠性和黏合度的问题。通过优化激光掺杂和电镀工艺，并进行良好的工艺控制，电镀金属电极的剥离强度可以达到3N，这与丝网印刷电极的强度相当。此外，通过优化参数，细栅线的高度可以达到20 μm，横截面约为半圆形，同时保持较高的吞吐量。LDSE组件也以优秀的性能通过了业内组件所必须接受的严格的耐久性测试。

结论

新南威尔士大学的激光掺杂选择性发射极技术极其适用于工业生产，与使用丝网印刷技术的传统同质结或选择性发射极结构相比，LDSE结构都占有优势。单面LDSE的衍生技术已经在若干公司进行测试，并在p型Cz单晶硅和p型多晶硅材料的基础上分别取得了19.0%和17.5%的转换效率。单面LDSE提高效率的设计特点包括采用30 μm宽的自对准快速电镀金属栅线，并对栅线以下的区域进行选择性高掺杂而对发射极进行轻掺杂。这些设计可以通过降低正面电极遮挡并提高短波响应将短路电流密度提高10%，并通过降低前表面复合提高开路电压。

新一代双面LDSE太阳能电池也将在背面采用高掺杂点接触电极和高效钝化层设计。D-LDSE将包含许多UNSW的PERL电池的设计特点。通过提高开路电压，p型Cz单晶硅和p型多晶硅D-LDSE电池的效率将有希望在2012年之前分别突破21%和19%，而这种技术同样适用于大规模生产。尽管单面LDSE电池的加工成本与传统丝网印刷技术相当，但其效率的提高可在硅片和组件方面降低加工成本，进而降低总体成本。

而对D-LDSE技术而言，其硅片、电池和组件层面的成本则远低于传统丝网印刷太阳能电池。这主要是由于其效率较高，同时淘汰了昂贵的网印工艺和网印浆料的使用。经过优化，LDSE太阳能电池生产工艺的可靠性和耐久性已经在严苛的工业条件下得到了验证。LDSE技术成本低廉，生产便利，工艺自对准，低温操作，适用于低成本材料和薄硅片，可靠性高，易于改建既有的网印生产线等优点，这一技术无疑将成为具有商业眼光的太阳能电池制造商的首选。激光掺杂选择性发射极技术作为成为未来低成本高效率太阳能电池技术，很可能替代最受欢迎的丝网印刷工艺技术。

免责声明

新南威尔士大学拥有激光掺杂选择性发射极技术的全套专利。有关专利授权或研究合作等相关事宜，请与作者联系 (matte@unsw.edu.au)，或致信新南威尔士大学创新研究中心的Neil Simpson (n.simpson@nsinnovations.com.au)。

作者简介

Matthew Bruce Edwards先生曾就读于澳大利亚新南威尔士大学的电气工程专业，并于2001年和2008年获学士(1级荣誉学位)及博士学位。他曾先后担任软件工程师和通信工程师、Pacific Solar公司软件和电子工程师、新南威尔士大学光伏研究中心讲师兼研究员、SolarWorld公司太阳能电池工艺工程师等职。他同时还从事网页设计等其他工作。Matt目前在新南威尔士大学从事博士后研究，并担任光伏技术转让团队(Technology Transfer Team)的项目经理。他的研究方向包括工业太阳能电池和n-型太阳能电池，并在多种期刊和会议上发表论文。

PV DIRECTORY

The leading online sourcing directory for the solar industry – find the perfect fit for your supply chain.

You Can Be That Missing Piece!

PV Directory offers you the fastest and most cost-effective way to generate new business opportunities in the solar supply chain. It offers an affordable alternative or addition to your advertising and PR campaign by providing company- and product-specific information to business professionals in the solar industry. The online directory also attracts businesses that are looking to enter the high growth solar industry.

Benefits at a Glance

- ▶ Put an always up-to-date summary of your company in front of key industry decision makers who are looking to source suppliers.
- ▶ Showcase your specific products and solutions in words and images.
- ▶ Make your services searchable against multiple product and geographical criteria.
- ▶ Exploit the Photovoltaics International branding and authoritative image to maximise the exposure for your company.
- ▶ Boost traffic to your corporate website and improve your SEO efforts.

If you're not in front of them, then who is?

Reach over **150,000 visitors** and **329,000 pageviews per month** as part of **www.PV-tech.org!**
Benefit from the **most authoritative PV website worldwide** and channel real business to your website!

Please contact David Evans devans@pv-tech.org or Nick Richardson nrichardson@pv-tech.org or alternatively, dial: +44 (0)20 7871 0123

