

丝网印刷制作选择性发射极及其金属化



丝网印刷制作选择性发射极及其金属化

摘要

选择性发射极技术是晶体硅太阳能光伏电池生产商提高电池效率，并同时降低每瓦成本的战略性手段。到目前为止，采用选择性发射极技术来大规模生产电池，已受到耗材成本和复杂工艺的制约。应用材料公司专注于研发低成本高效益的方法进行选择性发射极的大规模生产。本白皮书报告的方法将 Baccini 丝网印刷、烘干、p 型硅片扩散、去磷硅玻璃等工艺和优化选取的耗材完美地整合到传统电池生产线中。此外，我们还阐述了如何运用 Baccini® Esatto 技术™ 制作的高精度金属电极，以确保选择性发射极技术获得最大的电池效率。

简介

光伏电池生产商要在市场中制胜，就必须大力降低成本并提高电池效率。选择性发射极技术就是晶体硅太阳能电池生产商为实现这些目的而采用的一种方法。要低成本高效地提高晶体硅太阳能电池的绝对效率，就必须采用选择性发射极工艺，从而将追加投资和对现有电池设计及工厂硬件的更改都控制到最少。在制作选择性发射极方面，业界已经开发并测试了许多不同的方法，其复杂程度、成本和实现的效率增益各不相同。采用选择性发射极工艺面临着一系列技术难题，包括选择性发射极结的形貌构造、金属电极在狭窄选择性发射极区域内的精确对准，以及优化发射极在金属栅极图形间的位置，以最大程度地获得选择性发射极的效益。成功的选择性发射极解决方案必须拥有低成本高效益，能在现有生产线中采用，能通过技术优化提高电池效率，并能在不影响组件质量和可靠性的前提下扩展应用到大规模生产环境中。同时，这些解决方案的实施还必须是低风险的。

为何采用选择性发射极？

多年来，通过选择性发射极电池技术提高电池效率是许多设计和开发工作的重点，但大规模采用受到成本和复杂工艺的制约。目前的同质发射极技术已达到了实际设计极限。方块电阻大于 $80 \Omega/\text{sq}$ 的浅同质发射极能改善短波长光谱响应，但由于结较浅，很可能增加分流和/或增加接触电阻，接触面煅烧工艺区间受到限制。方块电阻小于 $60 \Omega/\text{sq}$ 的发射极一般接触电阻较低，但其区域复合损失较高。凭借选择性发射极技术，金属化和非金属化区域可相互独立地优化（图 1）。玻璃银金属触指下的高掺杂区域能改善欧姆接触，减少分流，并提供更宽的煅烧工艺区间。非金属化区域的低掺杂浓度拥有更好的短波长光谱响应和更低的复合损失（更高的 I_{sc} 和 V_{oc} ）。

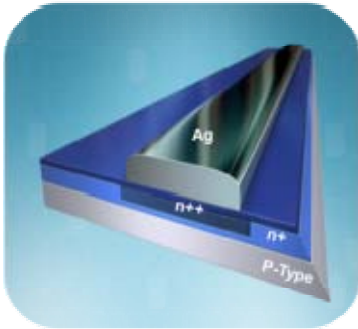


图 1: 选择性发射极工艺的目标在于通过优化的高掺杂发射极区域降低金属电极下方的接触电阻, 同时通过电极间的低掺杂区域来降低复合和饱和电流。

在实际工厂条件下, 比之传统同质发射极, 选择性发射极有望提高 0.7% 的效率 (图 2), 而单晶硅和多晶硅电池一般只能提高 0.3% 到 0.6%。本模型采用 A. Cuevas 2003 论文 [1] 所论述表面复合对表面浓度 N_s 的依赖关系, 使用 PC1D 软件计算理想形貌下的短路电流密度和开路电压。假设平均效率提高 0.5%, 一条年产 1,000 万片电池的生产线能额外产出 100 多万瓦的电量。难题是在提高效率的同时最大程度控制额外成本。这是选择一种方法来制作选择性发射极并将其整合到生产中的关键动因。

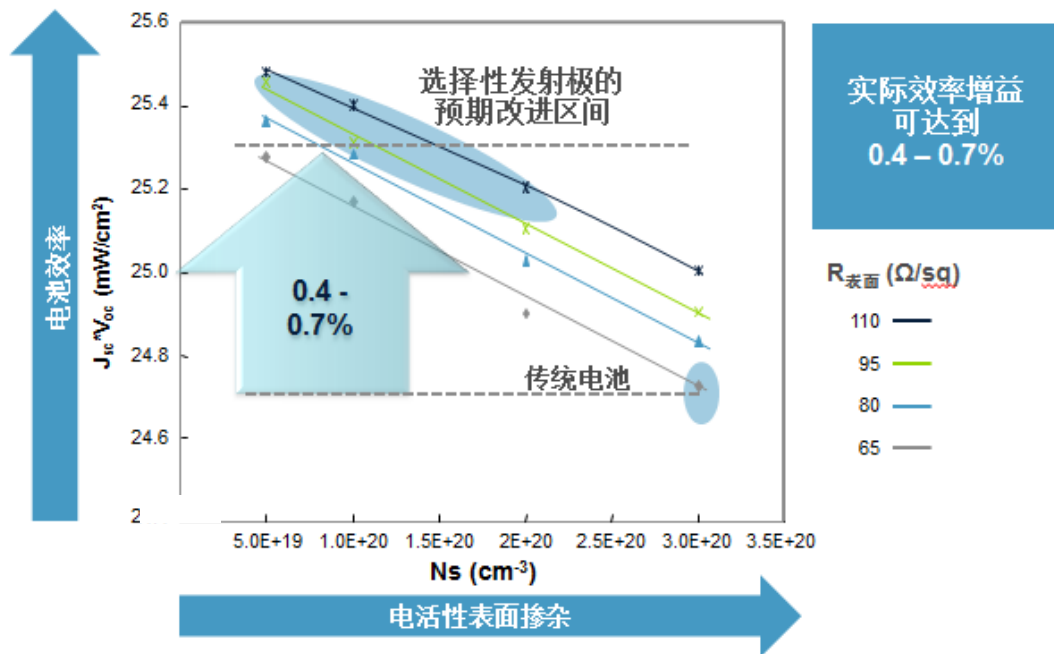


图 2: 选择性发射极建模 (资料来源: 应用材料公司太阳能研发部)

选择性发射极的制作方法

在硅电池中制作选择性发射极的方法有很多，其复杂程度和成本各异。图 3 概览了业内众所周知的选择性发射极制作方法。选择性发射极解决方案应符合特定要求，才能通过提高电池效率帮助降低每瓦成本。所选方法必须经济高效，最大程度降低复杂程度，减少额外工序。



图 3：选择性发射极制作方法

制作选择性发射极最直接的方法就是丝网印刷，利用业界现有的巨量丝网印刷机，实现低风险的制作工艺流程（图 3）。

丝网印刷制作选择性发射极

丝网印刷制作选择性发射极的方法直截了当、经济而高效。该方法采用广泛运用于晶体硅太阳能电池生产的丝网印刷技术，只要增加一道丝网印刷工序，在栅极下方形成高掺杂浓度区域。虽然丝网印刷是将低成本选择性发射极整合入现有生产线的简单方法，但要确保采用选择性发射极设计的电池达到最优性能，就必须考虑几个关键因素。将高效率的丝网印刷选择性发射极整合入晶体硅太阳能电池的生产工艺，面临着以下设计和工艺难题。

器件设计

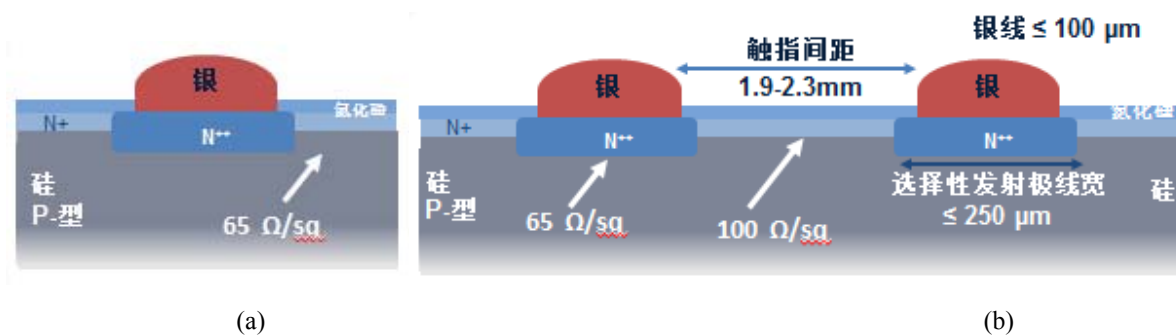


图 4：标准电池 (a) 和优化的选择性发射极电池 (b) 设计技术规格
(扩散后发射极目标饱和电流密度为 J_0 50-70 fA/cm²)

要在现有电池生产线中最大程度减少中断并通过选择性发射极最大程度提高效率，在器件设计上就必须做一些考虑（图 4），这包括栅极设计、发射极工程设计和栅线宽度等。栅极设计需考虑触指间距以优化填充因子并减少遮光，并需优化触指数量以实现发射极的高方块电阻。图 4 所示优化后选择性发射极工程设计形成了低接触电阻的 N++ 区域和更佳蓝光响应的浅发射极区域 N+。丝网印刷选择性发射极的线宽经过优化，以最大程度扩展浅结区域，同时允许金属电极对准有足够的公差。

切割损伤蚀刻与织构难题

无论进料的基底是单晶硅还是多晶硅，高效率硅电池首先都需要进行切割损伤蚀刻和织构。这些工序为启动太阳能电池生产保障了清洁、统一、大表面积的基础。为了通过选择性发射极大幅提高效率，这些工序必须经过优化，达到单晶硅和多晶硅的低反射规格。如果不考虑这些工序，那么由于总体光吸收与短波长区域的吸收之间的相互抵消，就会导致效率损失（图 6）。

扩散优化

在掺杂区经过印刷并烘干后，硅片就进入磷扩散工序。在传统的电池生产中，这一工序必须实现区域发射极性能与栅极下性能的平衡。浅而低浓度的掺杂区域降低了发射极的复合损失，但也导致接触电阻不良、栅极区煅烧工艺区间缩小的情况。选择性发射极消解了这种相互抵消的情况，改善了电极间低浓度掺杂区域的扩散载流子收集。在量子效率表上可预见响应对应的“蓝色”线条会更高（图 5）。磷扩散独立于栅极下高掺杂区域的形成。这是通过选择性发射极制作工序来形成掺杂区域，然后根据时间和温度调整扩散以形成活性表面掺杂浓度和形貌。

区域和选择性发射极如果未能优化，则会导致不良填充因子形成低短路电流和开路电压，降低电池效率。图 4 显示了对区域和选择性发射极使用四点探针的典型方块电阻。每个区域的表面浓度和结深皆应优化，以确保所需的形貌在去除磷硅玻璃之后未在表面上留下死层或磷沉淀物。可用 SIMS 和 SRP 测量来了解扩散形貌、浓度和活性表面掺杂百分比。多晶硅由于纯度低，因此热积存比单晶硅要低，使得极少有方法适用于多晶硅。但是，当温度控制在 840° C 以下时，丝网印刷制作选择性发射极的方法可调整用于多晶硅。

内部量子效率

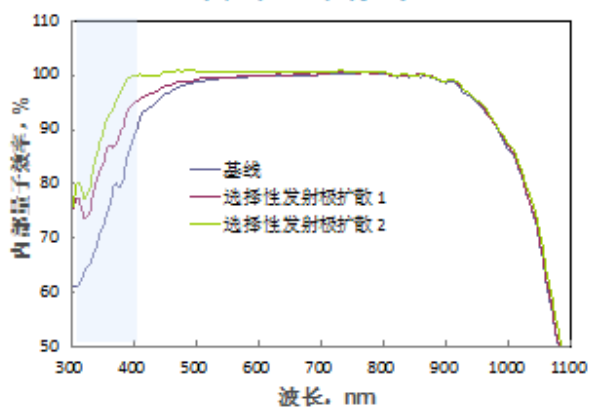


图 5: 内部量子效率 (资料来源: 应用材料公司太阳能研发部, 单晶硅)

抗反射层与钝化

选择性发射极会对表面钝化和抗反射层敏感。钝化层经过优化降低反射率, 从而全面发挥选择性发射极设计提高电池效率的潜力。正面的氮化硅 (SiN) 必须经过调整, 以提高镀层的氮浓度。加权平均反射率可用于提高氮化硅浓度, 达到 2.05-2.10 的目标折射率 (图 6)。

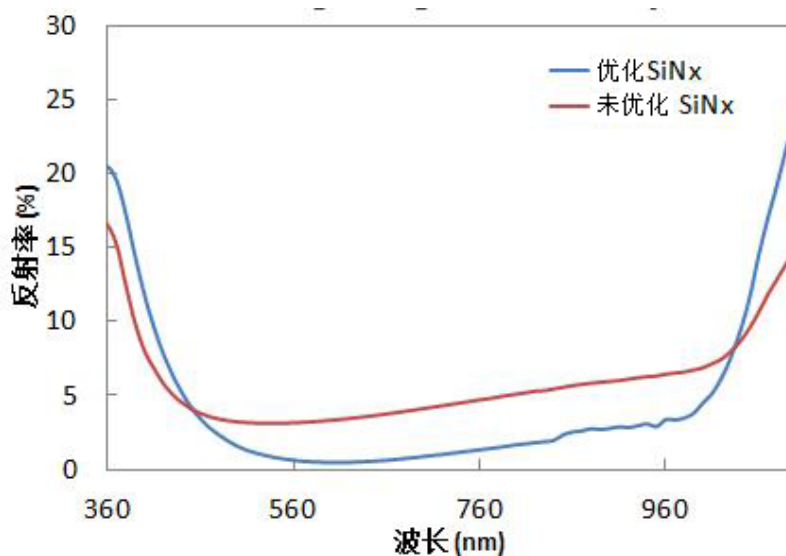


图 6: 加权平均反射率 (资料来源: 应用材料公司太阳能研发部)

耗材

耗材是采用丝网印刷制作选择性发射极的主要难题。应用材料公司与多家供应商合作，以确保丝网选择性发射极拥有合适的印刷耗材。

我们对适用于丝网印刷选择性发射极的高品质丝网做了透彻调查。选择性发射极丝网采用了非金属丝网和兼容的感光乳剂。为金属电极使用优化的丝网也很重要，以实现选择性发射极与金属印刷图形对准。对选择性发射极和金属电极采用同样的精准印刷能获得更窄的选择性发射极区域。确保选择性发射极丝网在整个使用寿命中的性能与金属化工序的相似也很重要。一些传统的丝网在使用周期中可能逐渐出现变形。由于多道丝网印刷工序将按顺序先后进行，消除或最大程度减少丝网在选择性发射极丝网和金属电极制作过程中变形就很重要，以确保前一道印刷工序与后一道工序的图形能匹配。

丝网印刷机的刮墨刀也应由适用于选择性发射极耗材的材料制成。使用能获得最佳印刷特性的非反应式材料至关重要。刮墨刀材料硬度计与丝网及感光乳剂会互相作用。我们验证了实现稳定持久性能的优化组合，以符合严格的生产性能标准。

金属化

选择性发射极的所有制作方法都与金属化技术以及其他电池生产工序兼容，但所有选择性发射极制作方法都需要卓越的对准能力，以求在选择性发射极区域上定位和精准印制金属触指及母线，确保不扩散至邻近的浅发射极区域。

对于金属化，整合选择性发射极的主要难题是定位选择性发射极区域。选择性发射极掺杂区域通过肉眼可见，但取决于硅片结构。由于不同掺杂浓度区域之间反差较弱，传统的视觉系统在选择性发射极图形对准方面效率不高。可靠定位这一金属化区域至关重要。Applied Baccini[®] 技术确定了为选择性发射极区域定位提供稳定工艺区间的特定光源、光学部件和摄像头，使得金属栅极和母线能精准印制在掺杂区，从而最大程度提高效率。未对准可能导致高串联电阻，如果用传统金属电极在低掺杂区域上印刷就可能造成短路。

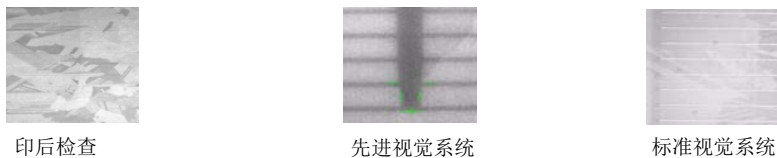


图 7：先进视觉系统能克服不同掺杂浓度区域之间的弱反差问题

运用专门为选择性发射极图形对准而开发的先进视觉系统能克服弱反差问题（图 7）；这项技术也可用作印刷后检测，以保证金属电极未超出选择性发射极宽度。图 8 提供了 Applied Baccini Esatto 技术对不同选择性发射极制作方法在单晶硅和多晶硅上识别选择性发射极图像的一些例子。视觉系统对于精准测定选择性发射极区域以精确对准金属电极，以及克服选择性发射极电池缺乏成品率改善辨识点等典型问题至关重要。

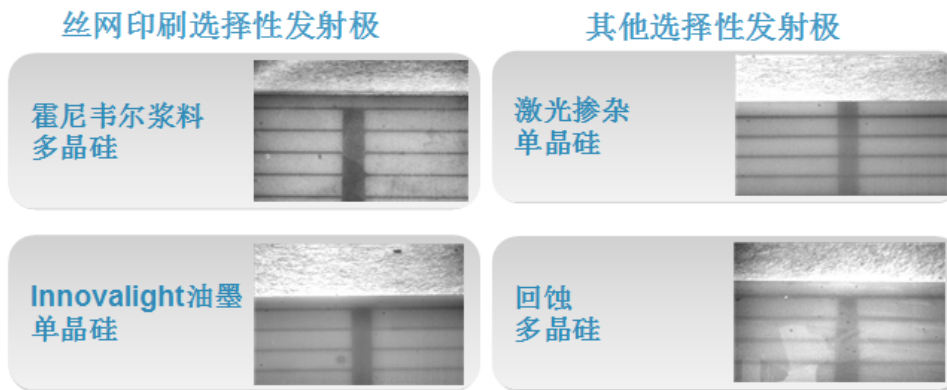


图 8: 采用 Baccini 对准工具的三家选择性发射极客户的对准数据

选择性发射极解决方案性能验证

与预期的一致，更好的蓝光响应和优化的磷扩散实现了相比基线超过 0.5% 的效率提升，使效率达到了 18.09%（图 9）。单晶硅太阳能电池生产采用低成本的掺杂浆料。掺杂线宽度已证实控制在丝网网孔 $\pm 30\mu\text{m}$ 之内。金属电极制作采用 Applied Baccini Esatto 技术。低于 840°C 条件下传统三氯氧磷扩散根据区域发射极结深、低饱和电流密度和总体器件性能进行了优化。内部量子效率显示蓝光响应率在 400nm 时提高至 92%。

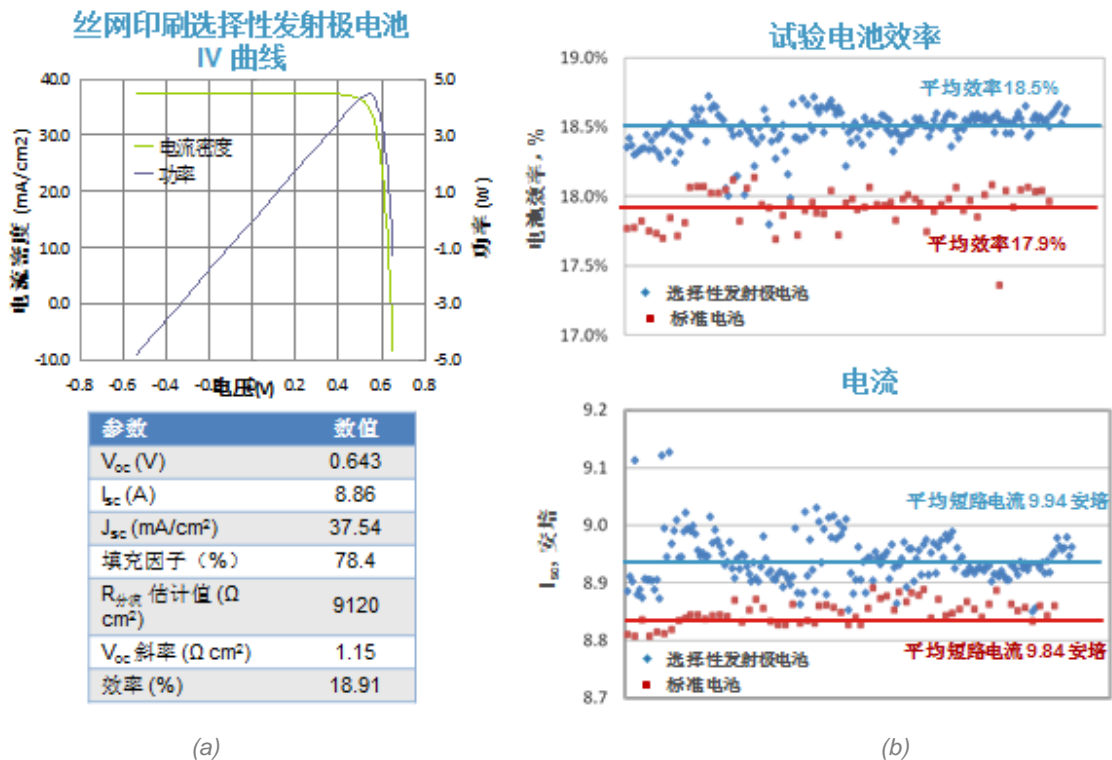


图 9. 丝网印刷的选择性发射极电池性能 (a) 丝网选择性发射极冠军电池 IV 曲线 (b), 客户数据经允许后印制 (156mm 单晶硅、霍尼韦尔浆料、Baccini 丝网选择性发射极和金属化工艺)

相关研究文献也报告了凭借丝网印刷的选择性发射极，产出的电池效率高达 19.2%，组件效率提高了 6% [2]。

结论

在太阳能生产环境中实施效率改善解决方案的一大难题是确保在现有电池生产线上采用相关技术的同时最大程度减少中断。丝网印刷的选择性发射极是快速、直接、低风险地实现电池高效率之道。应用材料公司已展示了一套经济高效的丝网印刷方法来制作选择性发射极，包括工艺优化和精确金属电极对准硬件。在实验室和客户工厂中的测试都已表明，使用应用材料公司设备生产的选择性发射极电池能使单晶硅选择性发射极电池的绝对光电转换效率比传统电池提高 0.5% 以上。

参考文献

1. A. Cuevas, M. Kerr, J. Schmidt, 3rd World Conf. on PV Solar Energy Conversion (第三届世界光伏太阳能转换大会)，日本大阪，2003。
2. Innovalight: High Efficiency Cells with Screen Printed Silicon Ink (创新之光：丝网印刷硅油墨高效电池)。2011 国际太阳能上海光伏展 (SNEC) 报告 (<http://wenku.baidu.com/view/4ccf2d88680203d8ce2f242c.html>)

半导体 | 显示屏 | 能源 | 服务

应用材料公司（纳斯达克代码：AMAT）开发技术，帮助高科技生产商将创新产品转化为增长机遇。我们先进的纳米生产设备、服务和软件协助半导体、平板显示器、太阳能光伏、柔性电子及节能玻璃等产业以人人都能负担的成本有效地开发先进技术。欲知详情，请访问 www.appliedmaterials.com。



Turning innovations into industries.™

Applied Materials
3050 Bowers Avenue
P.O. Box 58039
Santa Clara, CA 95054-3299
U.S.A.
电话: +1-408-727-5555

Applied Materials Italia Srl
Via Postumia Ovest, 244
1-31050 Olmi di S.Biagio de C. ta,
Treviso, Italy
电话: +39 0422 79-4401

欲知详情，请访问我们的网站 www.appliedmaterials.com/solar

请发送相关问询至 solar_sales@amat.com

本报告包含前瞻性陈述，这些陈述皆非历史事实，包括与应用材料公司业绩、策略、产品、竞争地位、运营效率、太阳能成本目标、核心竞争力、商机、客户支出以及经济和产业前景相关的陈述。这些陈述受已知和未知风险及不定因素的影响，所导致实际结果可能与以上陈述所明示或暗示的结果大不相同；这些风险和因素包括但不限于：市场对纳米生产技术产品的需求水平受诸多因素的限制，包括不确定的全球经济与市场条件、企业与消费者支出、对电子产品与半导体产品的需求以及政府的可再生能源政策和鼓励措施等；全球银行体系及金融市场的不利条件；客户利用率、能力需求以及获得充足资金、获取监管审批和/或满足基础建设要求等各方面的能力；公司所处市场的不同条件导致其各个领域运营结果的可变性；所收购企业的成功业绩；应用材料公司：(i) 开发、交付并支持多种产品、扩展市场及开发新市场的能力；(ii) 及时根据商业条件调整成本结构的能力；(iii) 规划并管理其资源与产能的能力；(iv) 实施可提高全球运营及效率的计划；(v) 获得并保护关键技术知识产权的能力，以及 (vi) 吸引、激励并留住关键员工的能力；以及应用材料公司 SEC 档案（包括 10-K 表）所描述的其他风险。所有前瞻性陈述以至今为止最新的管理层预测、预期及假设为根据，应用材料公司没有义务更新任何前瞻性陈述。

© 应用材料公司 2010 年。应用材料公司、应用材料公司徽标和其他指定或指示作为产品名称或服务的商标是应用材料公司在美国和其他国家的商标。保留所有权利。美国印刷。2011 年 9 月/第 1 次修订

