

相干相关干涉 (CCI)

在光伏设备中使用的防反射涂层的高级计量

于洋，博士

介绍

随着能源和全球环境问题关注的日益增加的需求，太阳能一直被认为是迄今为止所有的可再生能源中最丰富、取之不尽、用之不竭的清洁能源。

衡量太阳能电池的性能的重要指标，其是把太阳光转化为电能的效率。高效率、低成本的太阳能光伏电池，是大多数设计师和制造商的最关注的事。

为了最大限度地提高太阳能电池板效率，需要吸尽可能收高入射光的百分比。标准太阳能电池板通常反射超过他们所接收光能量的三分之一。这意味着，超过30%的光 - 潜在的电力 - 被丢弃、失去了。

为了提高太阳能电池板的效率，采用抗反射涂层就能消除这种表面的反射。这种技术通过它的易用性和低成本给太阳能产业带来了巨大的好处。

太阳能电池上使用的防反射涂层，和照相机镜头等光学仪器上所使用的类似。它们由一层薄薄的介质材料构成，特意选择了四分之一波长的奇数倍厚度，这意味着从防反射涂层顶面反射波和从半导体表面反射波的相位反相。由于反射波之间的相位差为180度，它们会互相抵消，从而大大降低了反射率，提高了太阳能电池板的效率。

“快速和非常高的灵敏度，使CCI SunStar成为研发和质量保证的理想工具。”

迈克尔·沃斯教授 -
英国CREST光伏教授

图1：光伏太阳能电池的特写



对太阳能光伏电池上的增透膜的厚度和粗糙度的准确测量，对提高它们的效率和可靠性、生产中成本控制起到了关键的作用。连贯相关性干涉技术 (CCI) 给范围广泛的防反射涂层提供了卓越精度的测量方案。

于洋
泰勒·霍普森
应用科学家，博士

测量防反射 (AR) 涂层

增透膜在太阳能光伏电池中扮演了的重要角色。例如，在硅太阳能电池中，防反射涂层用于提高对的光捕获能力和转换效率。氮化硅薄膜涂层表现了最常见的硅太阳能电池的钝化技术。氮化硅涂层的厚度对其防反射性能是至关重要的，因为四分之一波长是最佳的²。

太阳能电池计量

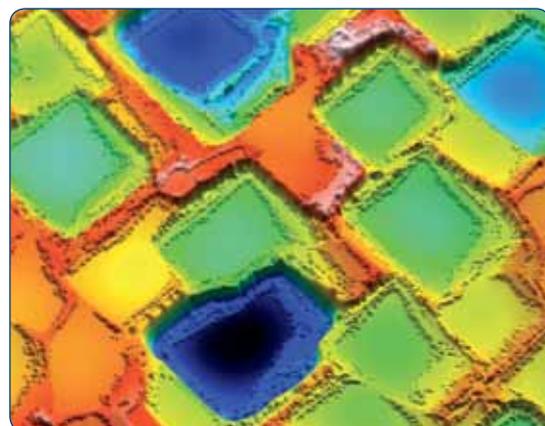
许多种计量工具已被用来测量薄膜厚度，这些措施包括一些常规的方法，如分光光度法、椭圆偏振法和物理台阶测量。其它方法也被用来勘测薄膜的厚度，如波长干涉法、棱镜耦合器法和激光束的热波检测法¹。

衡量表面粗糙度的计量工具也有多种类型的，如触针式轮廓仪和连贯扫描干涉仪 (CSI)。

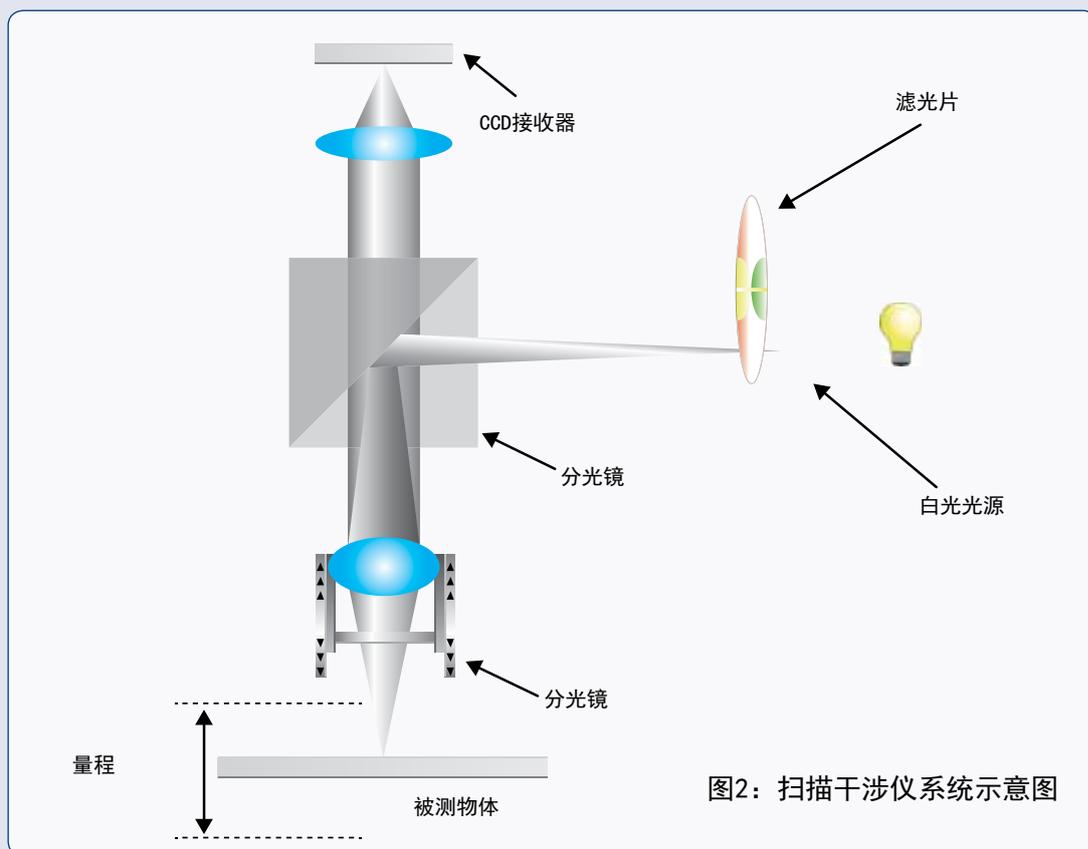
连贯扫描干涉法 (CSI) 正在成为流行的技术，由于其高的横向分辨率和测量速度。然而，传统的干涉仪的局限性之一就是可以被测量涂层的厚度；通常，这需要大于1-1.5微米，才能获得准确的数据。现在用连贯相关干涉 (CCI)¹ 加 HCF (螺旋复合场³) 技术，能够让可测量的厚度达到50纳米或更小。

使用CCI测量增透膜

连贯相关性干涉技术 (CCI) 是一项CSI专利技术，适用于多种从非常粗糙到非常光滑的不同类型表面的测量。因为它对光强非常低的表面也是非常敏感，所以对太阳能电池板转换效率的研究是特别理想的，只要通过一次测量就可以提供厚度和粗糙度的结果。



连贯相关干涉技术（CCI）



“各种工业的应用使CCI
变得越来越重要了。”

麦克·康罗伊

泰勒·霍普森公司
业务发展经理

扫描干涉仪系统的结构如图2所示，从光源射出的光由上分光镜直接转向射向物镜，由下分光镜再分开成为两个单独的光束。

一个束直接射到样品表面，另一束被转到内部参考镜上，两束重组后被送到CCD接收器上。干涉物镜早在Z方向的扫描过程中，两束光路径长度相同的时候就会发生干涉。接收测器测量光强度的变化，采集了一系列的快照作为原始数据。

这会产生一个从被测表面反射的光强分布图，然后再转换成一个被测表面的三维图像。不同的技术被用来控制干涉仪的运动，和计算表面参数。白光扫描测量的准确性和重复性，依赖于扫描机构的控制和从干涉数据得到表面特性的算法。

CCI测量在许多应用中变得越来越重要，它能提供：

- 全自动非破坏性测量
- 对表面精确和定量的描述
- 无论扫描范围大小，都能达到亚埃级的分辨率
- 快速和便捷的样品加载和调整
- 能测量各种不同的材料
- 高重复性的测量
- 一次测量就能分析粗糙度和台阶高度
- 薄膜厚度和界面表面的测量

薄膜厚度测量

具有亚纳米级的垂直分辨率和小于1微米的横向分辨率的400万像素摄像头，并使用专利的薄膜厚度分析软件，现在就可以用CCI SunStar来测量在50纳米或以下的薄膜厚度。

丹尼尔·曼斯菲尔德 - 泰勒·霍普森公司开发经理及物理学家，博士

干涉法的一个重要延伸是测量薄膜厚度的能力。当干涉信号在薄膜表面出现时，一种特殊的算法可以从干涉图中提取的薄膜厚度。在某些情况下，表面的信息也可以得到。

CCI的技术提供了两种不同的薄膜厚度测量的解决方案：

- 厚膜 (>1.5微米)
- 薄膜厚度分析 (小到50纳米或更小)

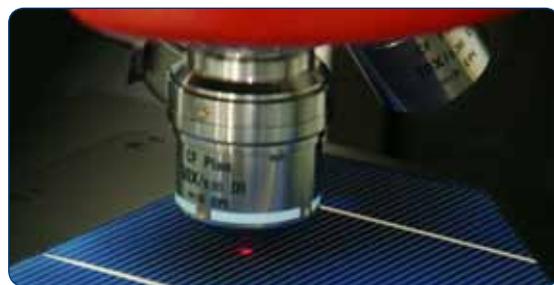
先进的CCI SunStar有400万像素的摄像头，每个像素都会像一个1微米的光学探头，在每个独立的点上高速测量该点的厚度(图3和4)。

薄膜厚度分析软件和连贯相关干涉技术 (CCI) 的组合，提供了无与伦比的薄膜测量能力。¹

图3: CCI SunStar



图4: CCI SunStar特写



传统厚膜测量

当薄膜的厚度大于1.5微米时(取决于折射率)，SWLI可以从两个表面中生成两组条纹(图5)。

薄膜的厚度可以由两个极大值的位置和应用相应材料折射率来得到。此外，两个界面(空气/薄膜和薄膜/基体)表面的信息可从分别的干涉条纹得到(图6)。

图5: 单个像素点测量7微米厚的薄膜

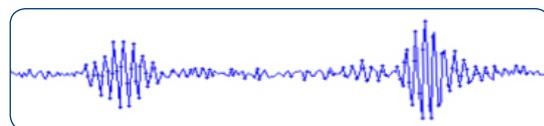
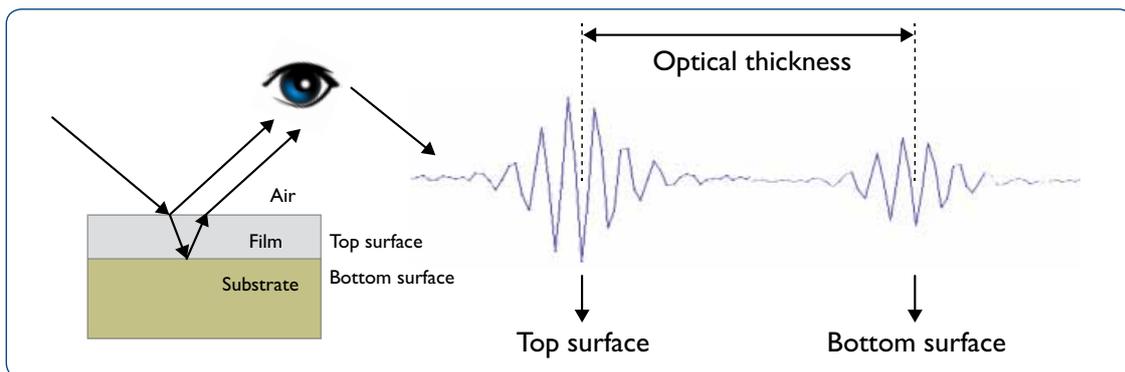


图6: 薄膜厚度的测定



厚膜的限制

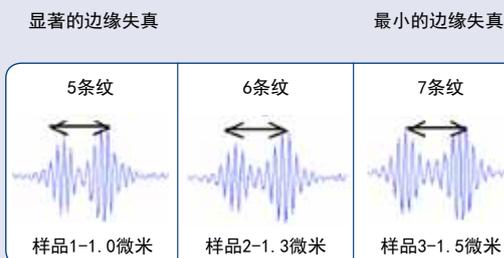
随着薄膜厚度的减小，这两组条纹会更加接近和重叠，直到他们最后成为一堆的干涉条纹。（图7）。

图7：单个像素点测量270纳米的薄膜



对于厚度小于1.5微米（取决于折射率）的薄膜，由于边缘的失真，使用厚膜的技术就不能再提取薄膜的厚度了（图8）。另一种替代方法已经被采用了。

图8：每个样品的单像素条纹



薄膜厚度低于~1.5微米时边缘失真显著增加。由于偏移峰的影响，在使用传统的厚膜分析时不可能得到薄膜的真正厚度。

薄膜厚度分析 - 解决方案

这个问题的一个新的解决方案（HCF）3已经被制定了，用它可以提取薄膜的信息。通过HCF功能的应用，连贯相关干涉技术（CCI）已成为理想的方法来获得薄膜的厚度信息。应用HCF技术，可以在~5微米到~300纳米的范围内，厚度测量的准确性优于1%。50纳米薄膜厚度也已经被测量过了；然而，需要注意的是这些薄膜厚度测量的准确性取决于材料的光学性质。

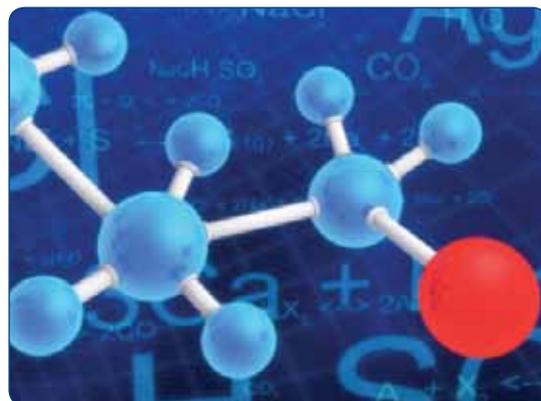


图9：太阳能电池板



AR涂层的测量结果

关于薄膜厚度测量的精确度，我们用经过椭偏技术测试过的样本（HORIBA, Jobin Yvon, UVISEL）进行了相关测试。

一系列从75纳米至300纳米的不同厚度的氮化硅AR薄膜，和从75纳米到900纳米范围的Niobia准备用于溅射。氮化硅薄膜沉积在抛光硅片上，Niobia薄膜沉积玻璃上。从表面上五个不同映射点的平均值得到椭偏法测量数据，使用的CCI SunStar采取了类似的办法。

niobia具有优良的化学稳定性和耐腐蚀性。铌氧化物涂层可以表现出不同的电气或光学特性，通过沉积和制造技术的调整，对于一个给定的应用来优化材料的特性。⁴

测试1：Niobia AR涂层

该数据显示了CCI从一次测量来同时得到薄膜厚度和准确的表面粗糙度的能力。

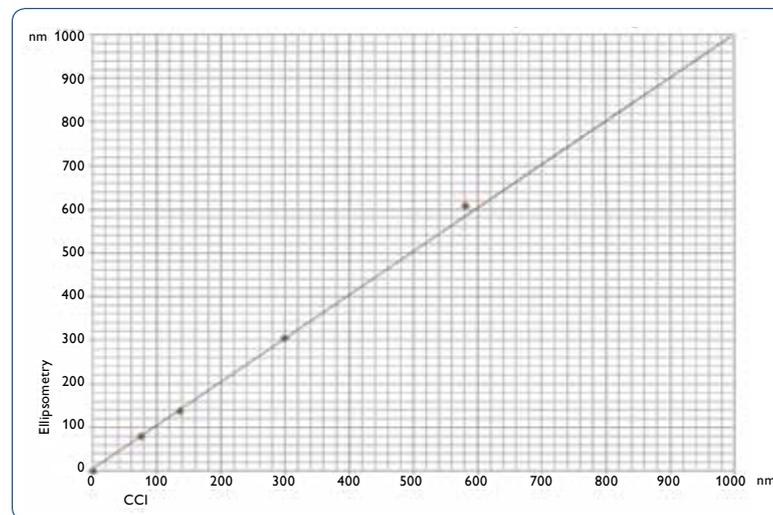


图1：CCI和椭偏法的厚度相关性 - 使用几块溅射在玻璃上的Niobia薄膜。

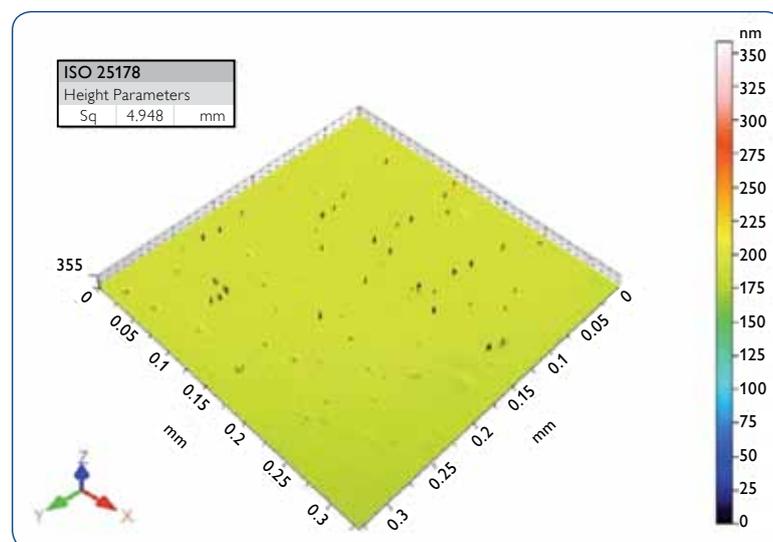


图10：876.5纳米厚溅射沉积Niobia层的三维CCI图像，RMS粗糙度参数Sq = 4.948纳米。

防反射涂层在改善光捕获能力和转换效率方面发挥了重要作用。使用CCI的技术²，可以方便地研究硅太阳能电池表面的氮化硅薄膜涂层最常见的钝化技术。

测试2：氮化硅AR涂层

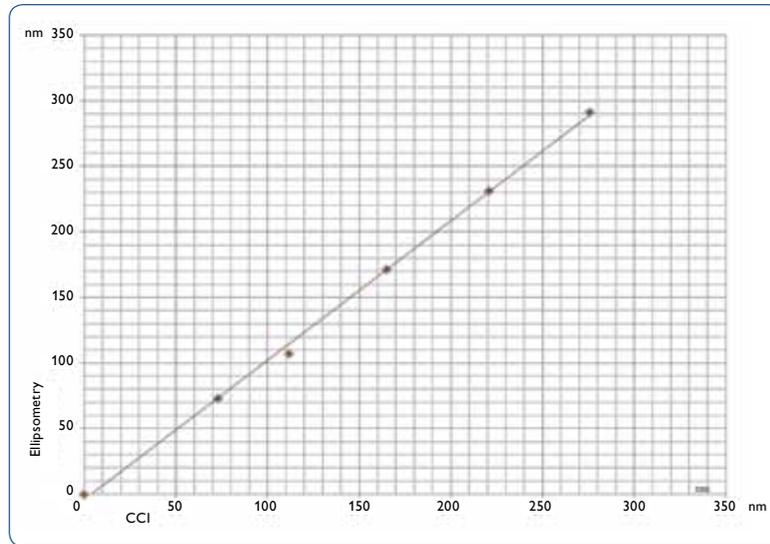


图2：CCI和椭偏法测量结果的相关性 - 使用抛光硅片上的氮化硅层

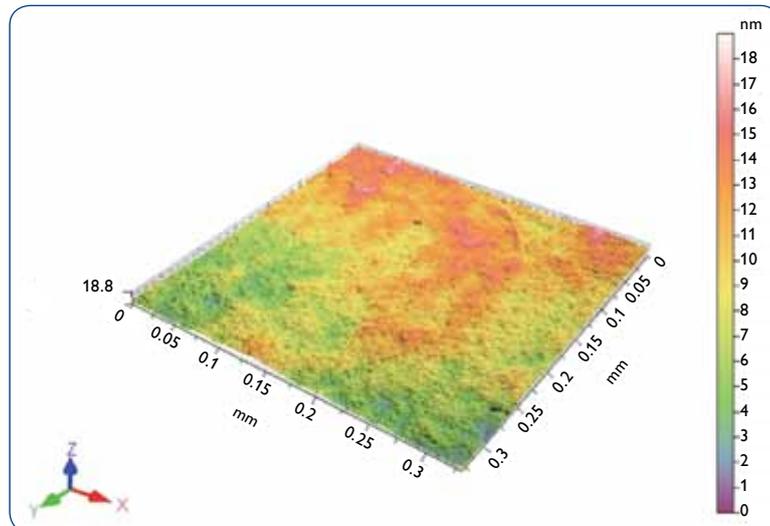


图11：164.9纳米厚溅射在抛光硅片上沉积硅氮化物防反射涂层的三维CCI图像。

结果

Niobia和氮化硅表面的测量结果，显示了CCI和传统的椭偏方法之间的良好相关性。CCI可以测量大量厚度约为50纳米的薄膜，在大面积上的横向分辨率为1微米。该技术也能测量表面特性，例如粗糙度，甚至可以测量低反射率的表面。

结论

CCI技术提供了快速、准确的三维表面分析，它具有非接触和从而非破坏性的优势。

与分光光度法和椭偏法相比，CCI SunStar具有更高的横向分辨率，可以提供快速、准确的测量，无需样品的前期准备，对操作人员技能的要求最低，测量面积从几平方微米到几平方毫米不等，而分光光度法和椭偏法只能在一个较大面积上得到薄膜的平均厚度。此外，CCI SunStar可以提供自动模式测量显示薄膜厚度的变化，通过大面积（约100平方毫米）的测量，来研究薄膜的均匀性。

新的膜厚测量技术加上连贯相关干涉技术，为薄膜提供快速理想的计量工具，可以准确地测量厚度小到50纳米或更小AR薄膜的厚度和均匀性。这些精确的测量可以帮助控制AR镀膜的质量，以消除反射，从而在很大程度上提高太阳能电池板的转换效率。



图12: 太阳能电池技术的一个样品

致谢

笔者感谢英国拉夫堡大学CREST的Bianca Maniscalco小姐和约翰·沃斯提供宝贵的测量结果和讨论，也感谢在泰勒·霍普森的迈克·康罗伊和丹尼尔·曼斯菲尔德和的宝贵支持。

参考文献

1. 华玉等，光阻薄膜的精密测量厚度使用扫描白光干涉，机电技术国际会议上，2011年，第三ICMET卷1-3
2. maniscalco, B等，使用相干相关干涉光伏专家会议（PVSC）2011年第37届IEEE硅光伏电池的计量
3. 曼斯菲尔德研发，薄膜扫描白光干涉，PROC提取。二十一周年ASPE会议，2006年10月。
4. C.G. granqvist, 固态离子53-56 (1992) 479.
5. 曼斯菲尔德四引以为豪的提取薄膜和从SWLI界面的表面：检讨，Metromeet, 2011年3月。演讲是在要求提供



Taylor Hobson 英国
(Global Headquarters)
PO Box 36, 2 New Star Road
Leicester, LE4 9JD, England

Tel: +44 116 276 3771
taylor-hobson.sales@ametec.com



Taylor Hobson 法国
Tel: +33 130 68 89 30
taylor-hobson.france@ametec.com



Taylor Hobson 德国
Tel: +49 611 973040
taylor-hobson.germany@ametec.com



Taylor Hobson 印度
Tel: +91 80 67823200
taylor-hobson.india@ametec.com



Taylor Hobson 意大利
Tel: +39 02 946 93401
taylor-hobson.italy@ametec.com



Taylor Hobson 日本
Tel: +81 36809 2406
taylor-hobson.japan@ametec.com



Taylor Hobson 韩国
Tel: +82 31 888 5255
taylor-hobson.korea@ametec.com



Taylor Hobson 中国 北京办公室
Tel: +86 10 8526 2111
taylor-hobson.beijing@ametec.com



Taylor Hobson 中国 上海办公室
Tel: +86 21 58685111-110
taylor-hobson.shanghai@ametec.com



Taylor Hobson 新加坡
Tel: +65 6484 2388 Ext 120
taylor-hobson.singapore@ametec.com



Taylor Hobson 美国
Tel: +1 630 621 3099
taylor-hobson.usa@ametec.com