



News & Highlights

三维芯片成像

Marcus Woo

Senior Technology Writer

有一种新的X射线成像技术，这种技术可以穿透计算机的每一层芯片，同时在保持芯片完整的前提下揭示芯片的秘密。这种技术被称为X射线断层成像技术，该项技术可被用于对芯片进行逆向工程、验证芯片设计以及识别假冒伪劣产品。这项技术也可被应用于科学和工程学的其他分支，用于放大具有平面几何形状的样品的三维（3D）结构。

瑞士保罗谢尔研究所（PSI）、苏黎世联邦理工学院和洛桑联邦理工学院物理学教授Gabriel Aepli说：“创新之处在于，我们不需要对芯片进行切片就能检查芯片。”Aepli、PSI的Mirko Holler以及来自美国洛杉矶南加州大学的Tony Levi共同领导了开发该项技术的团队。

通常，探测芯片的设计或对芯片进行逆向工程需要一层层剥离芯片，并用扫描电子显微镜（SEM）对其进行检查。“传统方法要求我们对芯片进行逐层检查，这实际上破坏了芯片上的所有东西。”加拿大渥太华的一家半导体逆向工程公司TechInsights的运营副总裁Jason Abt说。SEM的小视场要覆盖一个芯片可能需要成千上万张图像。

2019年10月发表在*Nature Electronics*杂志上的一篇文章对这种新技术进行了描述。该项技术不仅能在不破坏芯片的情况下创建芯片的3D图像，而且还具有可放大的广阔视野[1]。

美国加利福尼亚州帕罗奥图市的SLAC国家加速器实验室的光子科学教授Jerry Hastings表示：“这项技术的惊人之处在于它的类似于光学显微镜的‘变焦’功能。”Jerry Hastings并没有参加这项研究。

新技术结合了两种成熟的技术，即X射线断层成像技术和分层成像技术。在X射线断层成像技术中，相干的X射线束扫描旋转的样品，且射线束垂直于旋转轴。X射线从样品中散射出来。通过分析所得的衍射图，我们创建了样品图。在早期的研究中，Aepli及其同事演示了如何使用X射线断层成像技术来窥探芯片内部。但是，由于X射线束沿边缘撞击芯片，导致芯片吸收过多的X射线，这就需要在芯片上雕刻出一个支柱以使X射线到达我们感兴趣的区域[2]。

使用新技术就不需要雕刻或切割芯片。通过调整X射线束相对于旋转芯片表面的角度（断层成像技术的几何特征）就能让足够多的X射线扫描芯片的所有部分。研究人员首先将芯片基板的厚度抛光至20 μm，然后在由16 nm制造工艺制作的芯片上使用他们的技术使分辨率达到18.9 nm（图1）。

Abt说，当芯片样品很少时，新技术的非破坏性特别有优势。如当只有几个样本可被用于复制设计文件已丢失的独特旧芯片时，或者利用少量特制芯片来验证设计或检查是否安装了硬件木马时。新技术也可被用于验证已经渗透到供应链中的假冒芯片。例如，美国军方估计其设备（包括集成电路）的备用和替换部件中有15%都是伪造的，这导致了故障风险的升高[3,4]。

但是检查集成电路只是这项技术应用中的一种。该技术可被用于任何能被制备成平坦几何形状的样品的成像。例如，研究人员使用该技术去探测材料中的磁化强度，磁化强度对于开发磁传感器和存储设备很重要[5]。研究大脑运作方式的科学家不必通过对大脑组织样本进

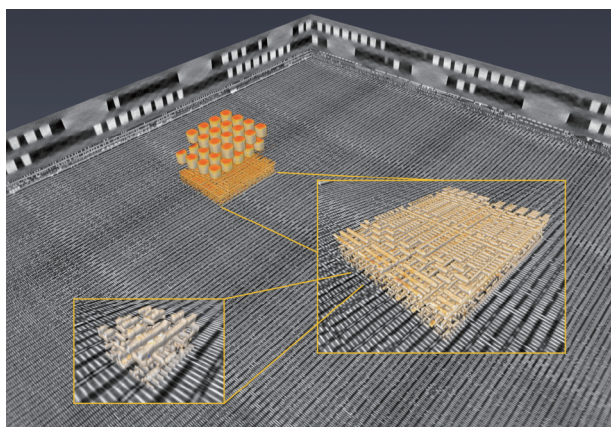


图1. 利用X射线断层成像技术数据集获得的图像，以灰度图的形式显示了集成电路芯片的3D虚拟切片表示，且最低层可见以及由这些层堆叠形成的较大的结构也可见。3D体积渲染图在不同放大倍数下显示为彩色。数据集的分辨率为18.9 nm。图片来源：保罗谢尔研究所，已获许可。

行逐层切片来检查样本。该技术还可以检查锂离子电池。锂离子电池的阳极会生长出一种指状结构（被称为树突结构），这种结构可能会引起电池短路。高分辨率图像可以更好地揭示树突结构的形成方式，从而帮助工程师设计寿命更长的电池。

成像技术至少具有一种潜在的局限性。该项技术需要像强大的同步加速器这样的X射线源。PSI的研究人员使用了瑞士同步辐射光源（Swiss Light Source）。位于美国伊利诺伊州阿贡市的阿贡国家实验室拥有先进的光子源（Advanced Photon Source），该实验室的物理学家Junjing Deng说，尽管世界上有十几台这样的机器，但并非都可以使用。

Deng表示，升级后的机器不久将会产生更亮的X射线，从而提高该技术成像的分辨率和速度。Aeppli与他的合作者利用计算机芯片进行的演示，需要耗时30 h的最初始宽视野扫描，然后需要耗时60 h的放大扫描，该过程覆盖体积范围为 $40\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$ [1]。研究人员建议，通过进一步改进技术并使用升级版的光源，例如，位于美国加利福尼亚州斯坦福市的SLAC

国家加速器实验室的直线加速器相干光源II（Linac Coherent Light Source II，其亮度计划在2020年秋季被提高100倍 [1,6]），可以在相同的成像时间内获得2 nm的分辨率，或者在3 h内以50 nm的分辨率对 $300\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ 芯片进行成像。

其他升级后的机器包括最近在法国格勒诺布尔市的欧洲同步加速器辐射设施（European Synchrotron Radiation Facility）启用的极亮光源（亮度提高了100倍） [7]，以及计划2022年在阿贡大学投产的先进光子源（Advanced Photon Source）（亮度提高了100~1000倍） [8]。功能更强大的新机器正在建造中，如北京的高能同步辐射光源（High Energy Photon Source）和上海的新X射线自由电子激光设施 [9,10]。

Deng表示，随着X射线源的不断增强和计算能力的不断提高，该技术将成为一种强大的工具，它能够在合理的成像时间内无损地提高分辨率和提供大视场。

References

- [1] Holler M, Odstrcil M, Guizar-Sicairos M, Lebugle M, Müller E, Finizio S, et al. Three-dimensional imaging of integrated circuits with macro- to nanoscale zoom. *Nature Electron* 2019; 2(10):464–70.
- [2] Holler M, Guizar-Sicairos M, Tsai EHR, Dinapoli R, Müller E, Bunk O, et al. High-resolution non-destructive three-dimensional imaging of integrated circuits. *Nature* 2017;543(7645):402–6.
- [3] Greenemeier L. The Pentagon's seek-and-destroy mission for counterfeit electronics [Internet]. New York: Scientific American; 2017 Apr 28 [cited 2020 Mar 6]. Available from: <https://www.scientificamerican.com/article/the-pentagon-rsquo-s-see-and-destroy-mission-for-counterfeit-electronics/>.
- [4] Wagner P. Combating counterfeit components in the DoD supply chain [Internet]. Defense Systems Information Analysis Center; 2 [cited 2020 Mar 6]. Available from: <https://www.dsiac.org/resources/journals/dsiac/spring-2015-volume-2-number-2/combating-counterfeit-components-dod-supply>.
- [5] Donnelly C, Finizio S, Gliga S, Holler M, Hrabec A, Odstrcil M, et al. Time-resolved imaging of three-dimensional nanoscale magnetization dynamics. *Nature Nanotechnol* 2020; in press.
- [6] Linac coherent light source [Internet]. Menlo Park: SLAC National Accelerator Center; [cited 2020 Mar 6]. Available from: <https://lcls.slac.stanford.edu/lcls-ii>.
- [7] European synchrotron radiation facility [Internet]. Grénoble: European Synchrotron Radiation Facility; [cited 2020 Feb 27]. Available from: <https://www.esrf.eu/about/upgrade>.
- [8] Advanced photon source [Internet]. Lemont: Argonne National Laboratory; [cited 2020 Feb 20]. Available from: <https://www.aps.anl.gov/APS-Upgrade>.
- [9] Zhao Z, Wang D, Yin L, Gu Q, Fang G, Gu M, et al. Shanghai soft X-ray free-electron laser facility. *Chinese J Lasers* 2019;46(1): 0100004.
- [10] Construction begins on hard X-ray FEL [Internet]. Shanghai: Shanghai Tech University; 2018 May 3 [cited 2020 Feb 20]. Available from: <http://www.shanghaitech.edu.cn/eng/2018/0503/c1417a24663/page.htm>.