

ASML使用多物理场仿真突破计算瓶颈

ASML 公司的成功案例表明了多物理场仿真对于计算机芯片行业的重要性, 他们的宝贵经验可能适用于所有制造商。

作者 **VALERIO MARRA**

在性能强大的计算机上运行复杂的仿真分析, 以设计下一代生产计算机芯片的机器, 这听起来充满了未来科技感。然而在全球领先的光刻系统供应商荷兰阿斯麦(ASML)公司, 这已经是司空见惯的场景。ASML 生产的设备主要用于将芯片设计图曝光到硅晶圆上涂覆的光刻胶层上。

ASML 的客户包括众多顶级计算机芯片供应商。为了保持市场竞争优势, ASML 需要能够帮助客户跟上摩尔定律的步伐。他们深知若想让最新一代产品保持目前的发展势头, 就必须对各种紧密耦合的物理现象有更深刻的理解, 例如相互耦合的流体流动、固体力学等多种物理效应。

对于众多高精度(微米或纳米级)设备制造商而言, 多物理场仿真是不可或缺的工具。

⇒ 极紫外光带来的机遇与挑战

制造具备更高性能的芯片, 意味着要在单位面积内塞进更多晶体管。芯片的物理尺寸在不断变小(图1), 同时制造过程又对细微的环境变化十分敏感, 这给制造工艺提出了巨大的挑战。现有芯片加工工艺的精度与前几代系统相比, 已经有了大幅提升。最新款光刻机(图2)利用波长为 13.5 nm 的极紫外光(extreme ultraviolet, 简称 EUV)来进行光刻。“光的波长与芯片上的元件尺寸(临界尺寸)之间存在直接线性关系。”机械分析组组长 Fred Huizinga 解释道, “我们关注的是纳米尺度的形貌特征, 真正是失之毫厘, 谬以千里。”

光刻与刻蚀工艺需要在洁净的真空环境中进行, 并且需要采用精密的空气轴承, 而非润滑油或滚珠。空气轴承是承载表面之间的一个压缩气体薄层, 它对振动极其敏感, 即使是非常小的压力波动, 也会对蚀刻的精度造成巨大的影响。“对于这类系统来说, 物理测试可能会耗费大量时间。实际上, 有些现象微小到难以进行测试或测量, 因为有时变形程度甚至比仪器的测量精度还要小一个数

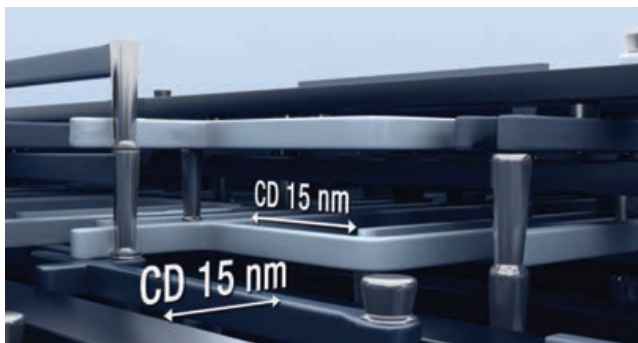


图1. 智能手机处理器的制程为纳米级。相比之下, 人类头发的直径比芯片制程大5300倍。

量级。”针对这种棘手的情况, 数值仿真成为了深入分析工程设计的唯一途径。

⇒ 功能完备的空气轴承设计工具

Huizinga 在加入 ASML 公司前, 从事过长达 25 年汽车行业的工程指导工作。他表示“如果只需要针对‘单个物理场’进行分析, 比如说单纯的热学或力学问题, 那么可以使用的工具有很多。但是, 我们的机器涉及许多物理现象, 因此需要使用很多仿真工具。”对于

Huizinga 而言, COMSOL® 软件是一件极有效的多物理场建模工具, 这是因为“纳米现象和复杂系统需要采用多物理场方法分析, 这就需要一套完整的多物理场仿真工具。”

ASML 开发的空气轴承模型示例(图3)充分体现了在研究中进行多物理场仿真的必要性。光刻机中时刻进行着大量的物理运动, 所以空气轴承对于 ASML 的重要性不言而喻, 由于空气轴承具有出色的刚度和隔热性能, 并且不会因摩擦而产生碎片颗粒。

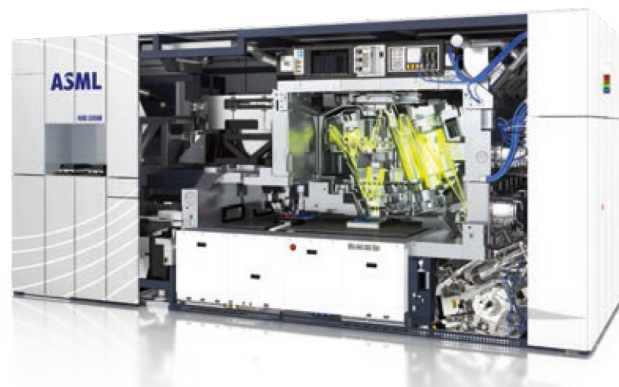


图2. ASML® TWINSKAN® NXE:3350B 型 EUV 生产系统, 采用 13.5 nm 波长的极紫外光, 每小时可制造 125 个计算机晶圆。它在高载荷下快速移动晶圆时必须维持绝对真空状态, 并确保晶圆扭曲始终小于 1 nm。

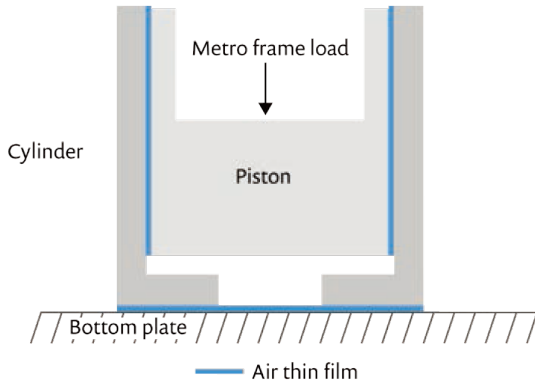


图 3. ASML 光刻系统的空气轴承示意图。图注：Metro frame load - Metro 框架载荷；Piston - 活塞；Cylinder - 气缸；Bottom plate - 底板；Air thin film - 空气薄膜

对仪器的高精度追求给 ASML 带来了新的挑战。气膜的压力分布会导致固体结构发生局部变形，影响轴承两侧表面之间的间隙宽度。而间隙宽度的变化会改变表面之间的空气流动，反过来又会影响压力分布，继而影响固体表面的变形程度(图 4)。这种现象需要使用一个流体-固体的全耦合模型进行分析。ASML 使用 COMSOL 软件创建了一个仿真模型，工程师可以自由指定所需的重要设计标准，其中包括平动和旋转刚度、负载下的间隙尺寸以及空气消耗量。

Huizinga 提及的另一个未来应用场景是模拟加工台上的晶圆所承受的载荷。晶圆上的形变非常小，为纳米量级。通常利用真空装置或静电场产生夹紧力使晶圆能够固定在加工台上，因此在

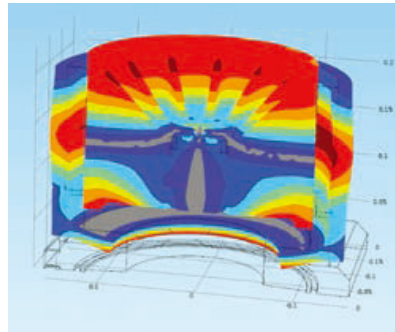


图 4. 仿真结果显示了空气轴承中气缸和活塞的径向变形。

“COMSOL® 软件是一件极为有用的多物理场建模工具，这是因为纳米现象和复杂系统需要采用多物理场方法进行分析，这就需要一套完整的多物理场仿真工具。”

—— FRED HUIZINGA, ASML 公司机械分析组组长

研究时必须将晶圆视为受重力、摩擦力、热效应和附着力影响的弹性体，这又是一个全耦合的多物理场问题。设计人员可以利用模型优化设计，无需经历既耗时又昂贵的样机制作流程。

⇒ 通过仿真 App 实现复杂设计

易用性对于一款仿真工具而言，与建模功能同等重要。即使是能够熟练操作多物理场仿真软件的工程师，简单易用的仿真 App 也同样会为他们提供巨大的便利，让他们能够免去大量常规或复杂的工作。ASML 的工程师使用 COMSOL Multiphysics® 软件的“App 开发器”开发了一个名为“空气轴承计算器”的仿真 App。团队成员借助这款易用性极佳的开发工具，无需修改原始模型，就可以对各式轴承设计的性能进行虚拟测试(图 5)。“仿真 App 帮助我们大幅减少了创建网格、设置分析和后处理的繁琐工作。”Huizinga 表示。

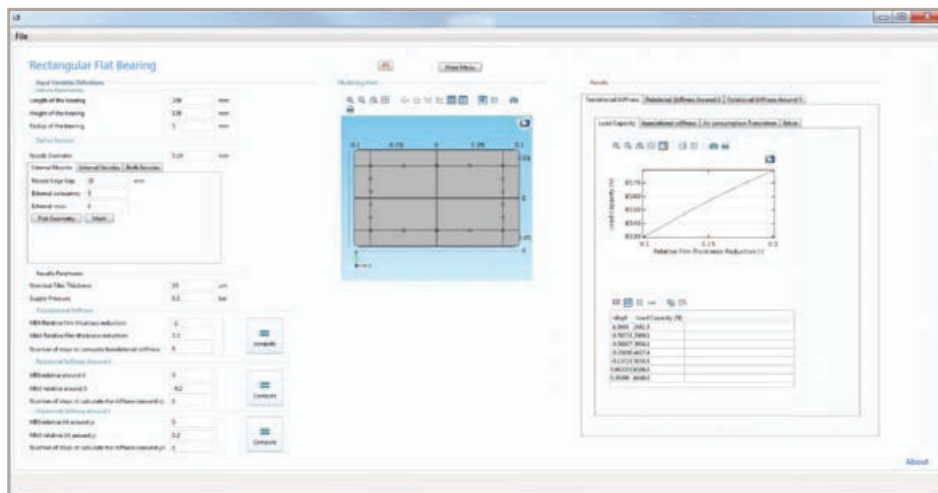


图 5. ASML 公司创建的空气轴承分析计算器可以让工程师通过输入尺寸参数和其他变量来获取结果，而无需进行指定网格、模型设置及其他后处理操作。

COMSOL 产品对于 ASML 公司的核心价值在于：通过开发多物理场模型，对设计进行充分验证，并让更多的工程人员能够方便地共享仿真成果。对质量、性能和成本效益的追求，需要构建更小的产品，并在缩小产品时能够保证更高的容差水平和微米级的装配精度，是众多行业的发展趋势。光刻行业无疑处于这一趋势的前沿，ASML 的成功也为其他行业。随着纳米级工程问题的不断涌现，多物理场建模时常成了唯一实用的解决方案。❖