

光刻机终极十问：有没有必要举全国之力，去造一台光刻机？

3月初，中芯国际迎来了久违的好消息：中芯国际与荷兰光刻机公司阿斯麦（以下简称“ASML”）签下大单，订购12亿美元光刻机。

近年来，我国虽然在科技研发上取得了多项重大进步，但在芯片研发和制造领域却亟待突破，特别是在新冠疫情之后，全球新一轮的“芯片荒”来袭造成了产业链对于芯片供不应求的问题，我国想要推进独立自主的芯片研发，光刻机的生产制造就显得尤为重要。

芯片虽小，制造难度却很大，而这一过程中一个关键的工艺机器——光刻机的制造成为了一大难题。芯片之于光刻机，就如同人和大脑的关系，但纵览几十年中国乃至全球光刻机产业的发展却表现的差强人意，呈现出了唯有荷兰ASML“一家独大”的局面。

我们不禁也对此有很多疑问：为何中国乃至全球对于制造光刻机的难度如此之大？ASML公司是如何做到光刻机产业中“全球霸主”的地位？为何该公司一台光刻机的售价达到了数亿美元？继3月初的《芯片终极十问》之后，该文章作者再次围绕光刻机的十个重要问题为您解答。

Q1：光刻机是做什么的？是在造芯的哪个过程发挥作用？

光刻机（英文“Mask Aligner”），又名掩模对准曝光机，是芯片制造流程中光刻工艺的核心设备。芯片的制造流程极其复杂，我们可以概括为几大步骤：硅片的制备—外延工艺—热氧化—扩散掺杂—离子注入—薄膜制备—光刻—刻蚀—工艺集成等。光刻工艺是制造流程中最关键的一步，光刻确定了芯片的关键尺寸，在整个芯片的制造过程中约占整体制造成本的35%。

光刻工艺的作用是将掩膜版（光刻版）上的几何图形转移到晶圆表面的光刻胶上。首先光刻胶处理设备把光刻胶旋涂到晶圆表面，再经过分步重复曝光和显影处理之后，在晶圆上形成需要的图形。

通常我们以一个制程所需要经过的掩膜数量来表现这个制程的难易。根据曝光方式不同，光刻可分为接触式、接近式和投影式；根据光刻面数的不同，有单面对准光刻和双面对准光刻；根据光刻胶类型不同，有薄胶光刻和厚胶光刻。一般的光刻流程包括底膜处理、涂胶、前烘、对准曝光、显影、刻蚀、去胶光刻检验等，可以根据实际情况调整流程中的操作。

Q2：光刻机是对哪类芯片有影响？如果完全没有光刻机，芯片是否还能正常生产？是否有光刻的替代品？

目前，无论是汽车芯片，手机芯片还是其他领域，包括军用，航空航天等应用的芯片都离不开光刻机。而光刻机本身按照应用可以分为几类，用于芯片前道制造的光刻机，用于后道芯片封装的光刻机和应用于LED制造领域的投影光刻机。

因为目前的芯片都还是硅基芯片，历经大半个世纪的发展，从最初的电子管到晶体管，再到集成电路的发明，晶体管的关键尺寸一步步缩小，而在纳米级别的尺度进行电路雕刻，目前我们所掌握的技术只有光刻。光刻技术在发展中不断的优化，是一步一步从历史的实践中得出来的工艺，如果想另辟蹊径，我们将面对的是未知的黑暗与技术深渊，其难度不低于研发出高端光刻机。所以如果没有光刻机，芯片是无法正常制造的，目前也不存在光刻机的替代品。

Q3：为什么光刻机的造价如此之高？究竟是哪部分成本较高？

一台高端光刻机的造价需要上亿美元，甚至比一台波音的客机还要贵。光刻机如此之昂贵的原因是因为其涉及系统集成、精密光学、精密运动、精密物料传输、高精度微环境控制等多项先进技术，是所有半导体制造设备中技术含量最高的设备。其中最关键零件之一，由德国蔡司生产的反射镜必须要做到史无前例的光滑度，瑕疵大小仅能以皮米（奈米的千分之一）计。

这样的精度是什么概念？ASML总裁暨执行长彼得（Peter Wennink）在接受媒体专访时解释，如果反射镜面积有整个德国大，最高的突起处不能高于一公分！

因此，光刻机也具备极高的单台价值量，目前世界上最先进的ASML EUV光刻机单价达到近一亿欧元，可满足5nm芯片工艺的生产。

ASML的光源来自于美国Cymer，光学模组来自德国蔡司，计量设备来自美国，但属于德国科技，它的传送带则来自荷兰VDL

集团。一台光刻机90%零件都是通过全球采购，当中涉及到4个国家十家公司，而下游客户的利益也与ASML牢牢捆绑。

Q4：中国明明知道本国的芯片科技较为落后，几十年前为什么不发展芯片和光刻机？

我国不是不重视，也不是不发展，而是在当时的国内以及国际大环境下，芯片的问题相对显得“渺小”了。

另外，当年发展两弹一星是国家安全的保障，而芯片问题在民族存亡的问题下，又显得太渺小。然而中国真的没有发展芯片吗？显然不是，事实上我国的光刻技术起步并不晚，上个世纪60年代我国的中科院就研究出了65接触式的光刻机。

1978年，中科院半导体所开始研制半自动接近式光刻机。

1990年，由中科院光电所承担的直接分步重复投影光刻机样机研制成功。

1996年，中科院成都光电所研制的0.8-1微米分步重复投影光刻机通过验收。

所以，国内的光刻机技术从未停止研发，我们也有自主技术的光刻机，只是从未拥有世界领先的光刻机罢了。

Q5：当前最知名的光刻机厂商是荷兰的ASML，为什么芯片强国美国、日韩没有一家光刻机大厂？在一个盛产风车和郁金香的国家，早期只有三十几个人的ASML是怎么崛起的？

要想知道为什么最好的光刻机来自荷兰，而不是美国，得从半导体发展的三个历史阶段说起。

第一阶段：上世纪60-70年代是早期光刻机发展阶段。

当时美国是走在世界前面的，那时候还没有ASML。

光刻机的原理其实像幻灯机一样简单，就是把光通过带电路图的掩膜（Mask，后来也叫光罩）投影到涂有光敏胶的晶圆上。早期60年代的光刻掩膜版以1:1的尺寸紧贴在晶圆片上，而那时的晶圆也只有1英寸大小。

因此，光刻那时并不是高科技，半导体公司通常自己设计工装和工具，比如英特尔开始是买16毫米摄像机的镜头拆了用。只有GCA、K&S和Kasper等很少几家公司有做过一点点相关设备。

60年代末，日本的尼康和佳能开始进入这个领域，毕竟当时的光刻不比照相机复杂。

1973年，拿到美国军方投资的Perkin Elmer公司推出了投影式光刻系统，搭配正性光刻胶非常好用而且良率颇高，因此迅速占领了市场。

1978年，GCA推出了世界上第一台商用步进光刻机DSW4800（direct step to wafer）。该机器使用g线汞灯和蔡司光学元件。以10:1的比例将芯片线路成像到10毫米见方区域。该机器价格为45万美元，第一台机器以37万美元的价格卖给了德州仪器的研发部门。由于刚开始DSW4800的生产效率相对较低，所以Perkin Elmer在后面很长一段时间内仍处于主导地位。

第二阶段是在80-90年代，半导体产业的第一次“转移”。

80年代左右，因为美国扶植，最开始是将一些装配产业向日本转移，而日本也抓住了机会，在半导体领域趋势崛起。

在90年代前后，日本的半导体产业成为了全球第一，高峰期时占据了全球超过60%的份额，出口额全球第一，超过美国。

在那个芯片制程还停留在微米的时代，能做光刻机的企业，少说也有数十家，而尼康凭借着相机时代的积累，在那个日本半导体产业全面崛起的年代，成为了当之无愧的巨头。

短短几年，尼康就将昔日光刻机大国美国拉下马，与旧王者GCA平起平坐，拿下三成市场份额。

而后来尼康作为九十年代最大的光刻机巨头，它的衰落，说来也充满偶然，始于那一回157nm光源干刻法与193nm光源湿刻法的技术之争。当时的光刻机的光源波长被卡死在193nm，是摆在全产业面前的一道难关。降低光的波长，从光源出发是根本方法，但高中学生都知道，光由真空入水，因为水的折射率，光的波长会改变——在透镜和硅片之间加一层水，由于水对193nm光的折射率高达1.44，原有的193nm激光经过折射，不就直接越过了157nm的天堑，降低到134nm了吗！

2002年，时任台积电前研发副总经理的

林本坚拿着这项“沉浸式光刻”方案，跑遍美国、德国、日本等国，游说各家半导体巨头，但都吃了闭门羹。

当时还是小角色的ASML（1984年飞利浦和一家小公司ASM Internationa以50:50组成的合资公司，最初员工只有31人）决定赌一把，相比之前在传统干式微影上的投入，押注浸润式技术更有可能以小博大。于是ASML和林本坚一拍即合，仅用一年多的时间，就在2004年拼全力赶出了第一台样机，并先后夺下IBM和台积电等大客户的订单。

第三阶段是在新千年前后时期，荷兰ASML的崛起。

1997年，英特尔攒起了一个叫EUV LLC的联盟。联盟中的名字个个如雷贯耳：除了英特尔和牵头的美国能源部以外，还有摩托罗拉、AMD、IBM，以及能源部下属三大国家实验室：劳伦斯利弗莫尔国家实验室、桑迪亚国家实验室和劳伦斯伯克利实验室。

这些实验室是美国科技发展的幕后英雄，他们之前的研究成果覆盖了物理、化学、制造业、半导体产业的各种前沿方向，有核武器、超级计算机、国家点火装置，甚至还有二十多种新发现的化学元素。

资金到位，技术入场，人才云集，但偏偏联盟中的美国光刻机企业SVG、Ultratech早在80年代就被尼康打得七零八落，根本烂泥扶不上墙。于是，英特尔力邀ASML和尼康加入EUV LLC。但问题在于，这两家公司，一个来自日本，一个来自荷兰，都不是本土企业。

当时的美国政府将EUV技术视为推动本国半导体产业发展的核心技术，并不太希望外国企业参与其中，更何况是八九十年代在半导体领域压了美国风头的日本。但EUV光刻机又几乎逼近物理学、材料学以及精密制造的极限。光源功率要求极高，透镜和反射镜系统也极致精密，还需要真空环境，其配套的抗蚀剂和防护膜良品率也不高。别说日本与荷兰，就算是美国，想要一己之力自主突破这项技术，可以说是比登天还难，毕竟美国已经登月了。

最后，ASML同意在美国建立一所工厂和一个研发中心，以此满足所有美国本土的产能需求。另外，还保证55%的零部件均从美国供应商处采购，并接受定期审查。所以为什么美国能禁止荷兰的光刻机出口中国，一切的原因都始于此时。

错失EUV的尼康，还未完全失去机会，让它一蹶不振的，是盟友的离开。当时的英特尔为了防止核心设备供应商一家独大，制作22nm的芯片还是一直采购ASML和尼康两家的光刻机。但“备胎终究是备胎”，一转身，英特尔就为了延续摩尔定律的节奏，巨资入股ASML，顺带将EUV技术托付。

另一边，相比一步步集成了全球制造业精华的ASML，早年间就习惯单打独斗的尼康在遭遇美国封锁后，更是一步步落后，先进设备技术跟不上且不提，就连落后设备的制造效率也迟迟提不上来。而佳能在光刻机领域一直没有争过老大，当年它的数码相机称霸世界，利润很高，但是对一年销量只有上百台的光刻机根本没有给予重视。2012年，英特尔连同三星和台积电，三家企业共计投资52.29亿欧元，先后入股ASML，以此获得优先供货权，结成紧密的利益共同体。在2015年，第一台可量产的EUV样机正式发布，意味着在7nm以下的先进工艺节点，ASML再无对手！

Q6：是否可以说全球的芯片产业被ASML扼制住了咽喉？有没有能对ASML产生威胁的厂商？他们的技术水平如何？

与其说全球的芯片产业被ASML遏制住了咽喉，不如说是被ASML及其背后的利益共同体扼制住了咽喉。除了ASML，目前世界上其他比较先进的光刻机厂商分别是日本的尼康和佳能。从目前尼康的官网上可以看到尼康最先进的光刻机型号为NSR-S635E。从其关键参数和介绍来看，其光源波长为193nm，水平大致相当于ASML DUV光刻机的水平。不过，依照ASML（ASML）、尼康、佳能三家公司的官方数据整理得知，去年全球光刻机总销售量为413台。其中ASML销售258台占比62%，佳能销售122台占比30%，尼康销售33台占比8%。按照销售额来计算的话，因为最昂贵的EUV只有ASML制造销售，所以总的份额占比依次是91%、3%、6%。所以目前无论是尼康还是佳能都无法对ASML构成威胁。

Q7：当前中国光刻机研发实力如何？是否具备独立制造光刻机的实力？相比ASML的崛起，中国有强大的基础，为什么现在造

出一台光刻机这么难？目前最好的国产光刻机是什么实力水平？相当于国际上什么样级别的产品？

目前中国具备独立制造光刻机的实力，光刻机企业包括上海微电子装备（SMEE）合肥鑫磊半导体，无锡迎翔半导体等。其中最先进的是上海微电子装备有限公司的600系列光刻机，可满足IC制造90nm、110nm、280nm关键层和非关键层的光刻工艺需求。该设备可用于8寸线或12寸线的大规模工业生产。据悉，SMEE今年即将交付可以制造28nm芯片的光刻机，对此我们拭目以待。

目前，SMEE的光刻机使用的光源分别为深紫外ArF（193nm）、KrF（248nm）、i-line（365nm），虽然已经用到了深紫外光源，但其整体制造能力距离ASML的第四代光刻机DUV光刻机还差一大截，整体水平相当于ASML 2003年左右的第三代光刻机TWINSCAN AT:1150i，从这方面来看，与国外的差距有18年。但随着新工艺研发难度的提高，国外的工艺进程也放缓，况且很多原理我们已了解，相信国内与国际先进制程的真实差距在10-15年左右。

Q8：ASML的光刻机制造，几乎也是靠全球化产业链完成的，按照当前的国际形势，中国制造一台光刻机的难度是不是比以往更大了？

高端光刻机的制造困难在其中的众多核心部件都是极其精密的，光刻机不是一个国家的技术，而是用整个西方最先进的工业体系在支撑。无论是在过去还是现在，中国想独立制造一台高端的光刻机都非常的难。对于光刻机众多的核心部件，想在每一个上面都做到世界级的精度几乎是一个不可能完成的任务。另一个原因就是《瓦纳森协议》的存在，它是从欧美强国制定的一一个先进技术限制出口的方案，旨在保护其先进核心技术不外泄。虽然它是由欧美40多个国家共同指定的，但是基本受美国掌控，并且直指中国。比如在2004年，捷克拟向中国出口“无源雷达设备”时，美国便向捷克施压，迫使捷克停止这项交易。

Q9：中国芯片厂商很多时候是买二手的光刻机，二手产品对芯片会有哪些影响？为何不买最新的？

造成中国厂商购买二手光刻机的主要原因还是由国内半导体产业链供需失衡导致的。为了缓解产能不足的情况，导致大量的二手设备流入中国，甚至现在连二手设备都已经大幅涨价。这也从侧面说明了目前我国芯片制造设备，即使在成熟工艺上依然无法自给自足。

至于为什么不买最新的，原因之一是因为买不到，还有一个原因是二手设备具有明显的价格优势，通常为新设备价格的70%不到。半导体作为资金密集型的产业，前期的投入是巨大的，所以削减成本以维持其利润也是企业要考虑的问题。另外很多领域需要的芯片是成熟的工艺制程，二手设备也是可以满足需求的。

Q10：ASML光刻机曾一度被禁止运送至中国，这是否也加大了中国的芯片荒程度？是否有比较好的解决方案？如果没有好的解决方案，中国芯片产业将面临怎样的困境？

这的确在一定程度上加大了国内芯片荒的程度。但是ASML的光刻机并未完全禁止出口给中国，3月3日中芯国际与ASML签订了12亿美元的协议购买光刻机，预计会包含NXT 1980Di、NXT2050i等DUV光刻机，可以用于制造14nm或者制程更先进的芯片。

目前的芯片短缺已经不仅仅是中国的问题，也是世界性的问题。短期之内没有太好的办法，但是长期来看，我国已然开始重视半导体产业，在“十四五”规划和2035远景目标纲要中，提到了要“增强集成电路产业自主创新能力，推动先进工艺等重大项目尽早达产”等战略目标。在摩尔定律放缓的今天，只要我们稳扎稳打，就一定能缩小与世界先进工艺的差距，甚至在未来十年迎头赶上。

EUV光刻机作为集成了全球最顶尖技术的产品，为其供应零部件的是来自不同国家的上百个企业。这也是为什么一位ASML的高管敢于放豪言说：即使开放图纸给中国，中国也造不出光刻机。事实上，ASML对向中国出售光刻机一直都是持积极态度的，2020年，ASML发往中国大陆地区的光刻机台数超过了其发往全球总数的20%，中国是ASML最大的客户之一。