

耳朵既能听声音，还能帮助身体维持平衡，是人体非常重要的一个器官。然而，现实生活中，很多人却正在遭受着耳聋、耳鸣、眩晕等耳部疾病的侵扰。诊断耳部疾病通常需要先进行影像检查，如计算机断层扫描（CT）和核磁共振（MRI），它们能无创、高清地呈现器官结构与功能状态，帮助医生早期准确识别疾病。但很多时候，尽管做了影像检查，临床医生仍未能发现病变，导致无法针对性治疗。这引发了一个问题：如果有一台“视力”更好的CT，是否能更有效地解决耳病？

影像检查——现代医学的“眼睛”

20世纪80年代开始，医学影像技术有了突飞猛进的发展，相继出现了磁共振影像技术、超声诊断技术、计算机射线成像技术等。那么，影像检查在疾病诊疗中的价值究竟有多大？不同的影像检查设备原理有何不同？

CT和MRI是目前影像检查最常用的两种手段，它们为疾病的早期发现和临床精准诊疗提供了客观依据。然而，两者的成像原理截然不同。CT利用X射线穿透人体，不同组织对X射线的吸收程度不同，从而在数字板上形成不同强度的转化，最终呈现出不同密度的图像。相比之下，MRI则是利用水中氢质子的特性进行成像。由于人体各部位含水量不同，成像的信号强度也会有所差异。MRI通过捕捉这些信号差异来形成图像。

尽管两者都生成了图像，但这些图像的特点各不相同。CT图像主要反映人体结构的物理特性，如高密度、低密度等，因此被称为密度成像。而MRI图像则主要反映水的含量，通过信号强度来区分不同组织，其软组织分辨率通常优于CT。此外，MRI还能通过多种序列采集不同维度的信息，如结构、形态、代谢、弹性等。

在应用上，CT和MRI各有优势，针对不同的器官和疾病，可能优选的方案不同。例如，对于鼻窦和耳科的病变，由于其解剖特点，CT通常是首选；而对于脑的病变，MRI则更具优势。因此，在看病时，医生会根据患者的症状和下一步检查的目标，来选择合适的影像检查方法。

许多耳部病变难以明确病因

现在疾病诊断20%—80%的信息，都来源于医学图像，影像学检查在临床诊疗当中越来越重要。在很多情况下，尽管症状明显，影像学检查

微米级骨质CT让耳部疾病诊断更精准

□ 王振常



王振常，中国工程院院士，影像医学专家，中国听觉和视觉系统影像感知与解析领域的带头人，主要研究方向为眼、耳鼻咽喉等头颈部疾病的影像学诊断。他成功主持研制出全球首台分辨尺度达50微米的专用骨质CT仪器，在国际上首次清晰显示出十余种引起耳聋、眩晕的重要微小结构，为制定治疗新策略提供了关键靶点。这一成果大幅提升了影像诊断效能，达到了国际同类技术的领先水平，一举解决了常规高端仪器骨质微小结构及隐匿病变“显不出”的国际性难题。

却难以发现病变。这不禁让人思考：是检查方法、设备，还是医生能力的问题？经过分析，这不是医生水平或检查技术的问题，而是设备本身的限制。特别是在耳科疾病中，常规CT检查难以清晰显示中耳、内耳的精细微小结构。

耳部结构非常精细且深在，如听骨链只有约8毫米长，最小的镫骨更是毫米级大小，且分多个微米级的部分。内耳包括耳蜗、前庭、半规管等，负责听力和平衡功能，也是毫米级和微米级的结构。此外，耳部还有众多神经、血管和骨性管道，如前庭水管和耳蜗水管，其直径分别只有200微米和100微米，非常微小。这些精细的耳部结构一旦发生病变，就可能引起严重的耳鸣、眩晕、耳聋等症状。因此，尽早明确病因至关重要。然而，目前医院常用的CT设备分辨率较低，对内耳结构显示不清，无法满足耳科疾病的诊断需求。另一种高分辨率的显微CT虽然能显示精细结构，但只能用于标本，不能在活体上应用。因此，我们急需研究一种临床可用的高分辨率CT，即耳科专用CT，以满足耳科疾病的诊断需求。

成功研制世界首台微米级骨质CT仪器

作为在全球医学界已经运用多年，非常成熟的常规CT，做如此大的提升，实现微小的耳部成像绝非易事，不仅涉及医学方面的专业知识，还有许多关键设备的硬件、算法、框架设计等一个个涉及工科方面的技术问题。

为此，我们与清华大学组建团队，专注于提升CT分辨能力。如果分辨率能达到组织切片水平，将带来新结构、新标准和新诊断体系的出现。

这不仅是一名医生职业生涯的荣光，更能为病人提供早期诊断的契机，并促使临床干预措施的重新制定或调整，可能改变预后。于是，验证关键成像指标，搭建成像实验平台，并利用显微CT对耳部标本进行不同分辨率的成像实验。经过反复认证，发现分辨率在40至80微米范围内对显示耳部小结构和小病变具有重要突破作用。最终，通过严谨的设计方案和巧妙的算法构建，在不增加CT辐射剂量的情况下，将分辨尺度确定提升至50微米。后在国家自然科学基金委的资助下，项目组随即开始攻关。

首先，针对关键零部件进行突破，成功研制出具有自主知识产权的高稳定、小焦点X线发生器。传统的医用大功率X线发生器焦点过大，导致成像分辨率低，且多依赖进口。而传统小焦点、微焦点的X线发生器功率又太小，无法实现临床成像。因此，我们自主研发了既小焦点又相对大功率的X线发生器，以满足临床需求。该X线发生器的核心指标远超市场产品，技术水平国际领先。

其次，排除呼吸心跳干扰，拍出清晰图像。在CT扫描中，当分辨率达到50微米时，心跳和呼吸等不可控运动会导致耳朵发生微弱扰动，影响图像清晰度。虽然常规影像检查中可以通过憋住呼吸来减少运动影响。但心跳无法避免，会导致耳朵在成像过程中发生不自主的小振幅运动，数据发生偏移。特别是在耳科20秒的扫描方式中，运动的影响特别明显，必须消除这种不可控扰动，否则图像会模糊。为了消除这种扰动，我们采用了双目视觉跟踪技术结合物理方法进行数据绑定和图像还原。

再次，采用双光源、双探测器、双成像系统的设计，实现精准定位成像。这一设计针对耳朵局部成像，成像视野为3.7厘米，满足耳科结构显

示需求。由于耳朵局部成像难以精准定位，大光源、大焦点用于整体脑袋成像，小光源则定位并精细成像中内耳区域。这样，大光源和小光源各有所长，实现精确定位和精细成像。此外，还可完成耳鼻咽喉、鼻腔鼻窦、眼眶、颅底、颌面部和口腔疾病的影像检查。大视野设计既便于精准定位，又可实现颌面部全区域的精准影像检查，有利于推广普及。而且从硬件和算法，我们均拥有自主知识产权。

十年磨一剑，最终成功研制出了世界首台微米级的骨质CT仪器，大幅提升了影像学在疾病诊疗中的应用价值，填补了国内外在该领域的空白，突破了常规CT空间分辨力的极限，实现了人体精细结构与隐匿病变识别能力的大幅跃升，让耳科疾病能够“看得清、看得准”。这不仅为耳科影像领域的重大突破，还标志着我国自主研发的高端专用CT设备已经达到国际领先水平，为我国耳科疾病研究和临床诊疗创新奠定了坚实基础。

看到从前看不到的耳部病变

常规CT的分辨率通常在300微米以上，而该新型CT的分辨率则达到了50微米。这一提升使得图像的清晰度、分辨尺度和数据挖掘能力发生了质的飞跃，能够捕捉到耳朵内部许多精细结构，尤其是早期微弱病理信息，从而显著提升医生的诊断能力。比如在扫描人体最小的骨头——镫骨时，常规CT只能模糊地显示镫骨，而新型CT则能清晰地展示镫骨的前弓、后弓、底板和镫骨头。这种清晰度使得医生能够准确判断病变情况，从而找出传导聋和感音聋的具体原因，如镫骨病变。

决难题，并建立有效沟通协作机制。资金方面，从研发到生产，光刻机项目需长期巨额投入。

以EUV光刻机为例，从EUV光刻技术提出到正式投入工业化生产，研究人员花费了30年左右的时间。20世纪80年代人们开始探索EUV光刻技术，并在80年代末首次验证了这项技术的可行性。但由于高昂的经济以及时间成本，只有ASML与其合作伙伴继续致力于开发可用于工业化量产的EUV光刻机。2010年，ASML交付了第一台EUV光刻机原型机。从2012年至2016年，ASML先后完成了对先进光源制造商Cymer、电子束计量工具领先供应商HMI等高科技企业的收购，并于2017年交付了第一台可用于工业化量产的EUV光刻机NXE:3400。目前，ASML持续与ZEISS、IMEC、Intel等多家先进科技企业以及全球超过180所高校、科研机构合作推进光刻技术的发展。据2023年ASML的财务年报，该公司在研发方面的投资从2022年的33亿欧元增至2023年的40亿欧元。在过去的17年中，该公司仅在EUV光刻方向的研发投入就超过了60亿欧元。

光源是光刻机的核心部件之一。光刻机对光源的工作波长、功率、转换效率以及寿命等参数均有着严格的要求。以目前唯一商用的EUV光刻机为例，该光刻机采用激光等离子体（LPP）光源，为了获得高转换效率和长寿命，需要在光源内部进行极其精确的激光打靶：液滴发生器产生直径20—30μm的锡液滴，其运动速度可达到80m/s，相当于复兴号高铁的速度；先利用一束预脉冲激光将高速运动的锡液滴打成饼状的靶材，然后再利用另一束主脉冲激光轰击靶材，将靶材转化为等离子体的同时放射出EUV光，这一双脉冲的打靶过程需要在百万分之几秒内完美地配合完成。因此，需要一套精准的测量及控制系统，能够进行高速、高精度的测量与打靶控制，方可满足工业化量产的需求。



学习时报与央视中国经济大讲堂联合办



更多精彩内容扫码看视频

光刻机研制为什么难

□ 李中梁

光刻机的工作原理和历史演进

当今社会生活中，集成电路几乎无处不在，小到身份证、手机，大到高铁、飞机，都离不开集成电路。集成电路自诞生至今，一直向着微细化的方向发展，单个芯片上的晶体管数量已经由最初的几十个发展到现在的几千亿个。

集成电路制造的核心工序是利用光刻机在硅片上构建电路图案。光刻过程决定了集成电路芯片上电子元件的尺寸和位置。从1961年至今，为了满足集成电路制造的需求，人们研发出了多种类型的光刻机。按照曝光方式来分，光刻机可以分为接触式、接近式和投影式。接触式和接近式光刻机的极限分辨率均停留在微米量级，难以满足日益减小的芯片特征尺寸的需求。投影式光刻机是目前的主流光刻机，当今最先进的极紫外（EUV）光刻机就属于投影式光刻机。

投影式光刻机由多个分系统组成，包括光源、照明系统、投影物镜系统、掩模台与掩模传输系统、工件台与硅片传输系统、对准系统、调焦调平系统、环境控制系统等。这类光刻机本质上是一种复杂的投影系统：光源通过照明系统均匀照明放置在掩模台上的掩模版，掩模版上制作有预先设计好的集成电路图案，该图案通过投影物镜系统投影到工件台上涂有光刻胶的硅片，完成一次曝光。之后，工件台移动硅片，再进行另一次曝光。

提高光刻分辨率是光刻机演进的主线，极大地推动了集成电路制程节点的进步。研究人员通过采用更短波长的光源来提高投影式光刻机的分辨率，依次发展出了紫外（UV）光刻机、深紫外（DUV）光刻机和EUV光刻机。

光刻技术研发的难点与挑战

光刻机，被誉为集成电路产业链上的“皇冠上的明珠”，是人类迄今为止所能制造的最精密装备之一，其研发过程不仅技术难度极高，还面临着多方面的挑战。技术方面，光刻机涉及光学、材料科学、机械工程等多领域尖端科技，需跨学科团队持续创新。合作方面，因技术复杂，需多领域科研机构与企业紧密合作，共同解

光刻机的投影物镜系统是成像光学最高境界，其波差需要达到纳米甚至亚纳米量级，这对投影物镜的镜片级加工与检测，以及系统级的检测与装调等都提出了严苛的要求。以EUV光刻机为例，为确保成像性能，投影物镜的镜面必须以极高的精度进行加工：在ASML公司最先进的高NA EUV光刻投影物镜系统中，口径1.2m的反射镜表面需要加工到面形均方根误差小于0.02nm，相当于在中国国土面积内仅有人类头发丝直径大小的高度起伏。

光刻机的机械系统设计巧妙地融合了稳定性与高效能的双重需求。以EUV光刻机为例，工件台的运动速度可达5m/s，并且工件台和掩模台需要高速同步运动，同步运动误差的平均值需要小于0.5nm，相当于两架以时速1000km飞行的飞机，相对位置偏差的平均值控制在0.03μm（人类头发丝直径的几千分之一）以内。工件台还需具备惊人的加速度——达到7倍重力加速度（7g），这一性能确保了硅片能在极短时间内迅速定位至预定位置。

掩模版作为光刻系统图像信息的来源，其制备过程中形成的脏污、刮伤、图形异常等缺陷均会改变掩模的光学特性，从而影响成像质量，降低芯片成品率。由于光刻掩模版制备要求高、工艺难度大且需要根据光刻技术的发展而更迭，长期的技术积累与充足的研发资金均不可或缺。国际领先的掩模版制造商Toppa一直致力于掩模版业务，其于2005年收购了杜邦光掩模公司，并于同年开始与IBM、格罗方德半导体、三星联合开发高端掩模版技术，从最初的45nm制程节点发展至目前的2nm制程节点。

涂覆于硅片上的光刻胶与电子器件的性能和良品率直接相关，也是随着光刻技术的发展而发展的。在从DUV光刻向EUV光刻过渡的过程中，研究人员遇到了严峻的挑战，即在相同条件下，光刻胶吸收的EUV光子数

位的骨微结构。例如，在膝关节上，能清晰地观察到髌骨软化等早期病变，而常规CT则无法做到。同样，在踝关节上，也展现出了更高的分辨率。

未来展望

影像学检查是医生的“眼睛”，为精准诊疗提供依据。50微米耳科CT如同“望远镜”，让影像科医生“侦察”得更远更清，带来了疾病早期诊断和健康评估的新技术、新标准、新体系，意义重大。未来，随着时间的推移和科技的飞速发展，未来医学影像设备将会出现新的发展。更精准：分辨尺度是影像设备的核心追求。从毫米级到微米级，期望未来能达到分子或纳米层面，进一步提升对健康管理 and 疾病精准诊疗的价值。更专用：专用设备如耳科CT、乳腺CT等已成为趋势。未来，将看到更多以器官为靶区的专用设备开发，如头部核磁、关节MR、胸部和心脏CT/MR等，带来小型化、智能化、精准化和便捷化的优势。更智能：在数字时代，人工智能将广泛应用于影像设备的研发和应用。从数据采集到成像，再到影像解读，人工智能将助力形成智能影像平台，推动医学影像的智能化发展。更多维：人体器官具有多种生理功能和物理特性。未来影像设备将能够采集更多维度的信息，如结构特性、血流特性、弹性特性、空间位置变换等，为医生提供更全面的诊断依据。更便捷：为了提高可及性，未来影像设备将更加便捷。例如，在病房内，设备可以移动到病人身边进行检查；在急救情况下，也可以迅速将影像设备移至现场。更快速：快速成像将是未来医学影像设备的重要发展方向。通过一次扫描多序列成像等技术，缩短检查时间，减少预约和等待时间。更安全：在算法和硬件设计上不断优化，降低辐射剂量，提高核磁设备的安全性，如加强屏蔽管理和研发超低场核磁共振技术。更低廉：随着技术的发展和市场竞争的加剧，未来大型影像设备的价格有望逐渐降低，使更多医疗机构和患者能够受益。为此，需要各界共同继续致力于高性能精专影像设备的研发，为推动国家医疗设备快速发展和健康中国建设贡献力量。

量仅为DUV193nm波长的1/14。这就要求要么在EUV波段创造出极强的光源，要么发明更灵敏的光刻胶。考虑到进一步提高EUV光源的功率极具挑战性，为弥补光刻胶对EUV光子的低吸收率，EUV光刻胶需要具有不同于前几代光刻胶的独特性能。经过JSR、Inpria、LamResearch等EUV光刻胶领先供应商的多年持续研发，实现了EUV光刻胶灵敏度与分辨率的突破，方使得EUV光刻在2018年进入7nm及以下制程节点的大规模量产。

光刻技术的发展趋势

目前，最先进的EUV光刻技术已被应用于2nm制程节点的芯片量产，并且仍在持续优化中。为了不断逼近EUV光刻技术的理论分辨率极限，并确保光刻机具备可靠的系统性能，还需要继续深入研究如何有效提升光源功率所带来的热效应，同时开发边缘粗糙度更低且能保证特征尺寸精确控制与良好附着力的EUV光刻胶。此外，减少光源内部的碎片污染以延长收集镜的使用寿命，以及降低曝光过程中污染物附着在掩模上的概率，也是当前重要的研究课题。

在EUV光刻技术实现量产的同时，许多研发机构也在尝试研发纳米压印以及定向自组装（DSA）等成本相对较低的下一代光刻技术。针对这些新兴的光刻技术，需要重点研究新型材料的集成应用、立体图形化工艺的开发，以及以实际应用需求为导向的图形设计。

（作者系中国科学院上海光学精密机械研究所研究员）

