《海纳百川·藏书博览》
简装书库·自然科学总论
（自然科学普及读物）

创造奇迹的光
21 世纪的激光技术
02

雷仁湛

上海市黄浦区教育信息中心

需要全本请访问 www.ertongbook.com

超级工具

在现代工业生产中，特别是光电子工业生产要求加工的零件尺寸微小，精密程度非常高。因此要求有精细的加工工具和精细加工技术。激光可以做成“超级工具”，进行各种精密加工。比如，用它可以在各种坚硬和柔软的材料上打微米量级的小孔，刻划宽度为微米量级的线条；用激光可以检查出元件上微米量级的缺陷。激光也可以做成精密的尺子，对长度作精细量度；可以做成精确的准直线，让我们快速、准确安装设备。激光还可以让我们精确检查大气污染物质和它们的分布，可以预报地震。

激光精密加工

我们日常用的袖珍计算机、录像机、电传机；各种自动化控制生产设备、各类航天航空仪器仪表；科学研究用的各种仪器，它们的尺寸不断在缩小，微型化是产品今后的发展方向。制造的家用电器和仪器设备小型化，装配它们用的元件就更要小型化。不言而喻，需要能作精密加工的工具和能作精密计量检测的工具。用激光可以做成能进行各类加工的工具和测量工具，而且能够达到很高的精密程度。

打微小直径深孔

在元件上开个小孔是件很常见的事。但是，如果要求在坚硬的材料上，比如在硬质合金上打大量 0.1 毫米到几微米直径的小孔，用普通的机械加工工具怕是不容易办到，即使能够做，加工成本也会很高。现有的机械加工技术在材料上打微型小孔是采用每分钟数万转或者几十万转的高速旋转小钻头加工的，用这个办法一般也只能加工孔径大于 0.25 毫米的小孔。在今天的工业生产中往往是要求加工直径比这还小的孔。比如在电子工业生产中，多层印刷电路板的生产，就要求在板上钻成千上万个直径约为 0.1～0.3 毫米的小孔。显然，采用刚才说的钻头来加工，遇到的困难就比较大，加工质量不容易保证，加工成本不低。早在本世纪 60 年代后，科学家在实验室就用激光在钢质刀片上打出微小孔，经过近 30 年的改进和发展，如今用激光在材料上打微小直径的小孔已无困难，而且加工质量好。打出的小孔孔壁规整，没有什么毛刺。打孔速度又很快，大约千分之一秒的时间就可以打出一个孔。

激光在材料上钻出小孔的道理很简单，做法也不复杂。激光有很好的相干性，用光学系统可以把它聚焦成直径很微小的光点（小于 1 微米），这相当于用来钻孔的“微型钻头”。其次，激光的亮度很高，在聚焦的焦点上的激光能量密度（平均每平方厘米面积上的能量）会很高，普通一台激光器输出的激光，产生的能量就可以高达 10^9 焦耳／厘米 ^{2}，足可以让材料发生熔化并汽化，在材料上留下一个小孔，和用钻头钻出来的一个样。

怎样用好激光“钻头”，激光科学工作者也做了许多研究工作。他们发现，用每秒发射许多个光脉冲（通常叫高重复率激光脉冲）做“钻头”，打出来的小孔质量比用单个光脉冲，或每秒时间内少数几个光脉冲打出来的孔好。道理大概是这样：在用每秒一个光脉冲或少数几个脉冲打孔时，对每个光脉冲的激光能量要求比较高，让材料能被加热至熔化才能打出孔。但是，融熔了的材料没有办法充分汽化，却把在它附近的材料加热和使它们汽化，结果，被打出来的小孔在形状大小上就不那么规整。如果使用的是高重复率激光器输出的光脉冲，这时每个光脉冲平均的能量并不很高，但由于光脉冲的宽度窄，功率水平却不低。于是每个激光脉冲在材料上形成的融熔体不多，主要是发生汽化。由于使小孔附近的材料加热时融熔体很少，因而也就不出现在用单脉冲打孔时出现的事。打出的小孔形状和大小就规整得多了。

要使打出的小孔质量高，还需要注意激光焦点位置的选择。选择焦点位置的原则大致是这样：对于比较厚的材料，激光束焦点位置应位于工件的内部〔见图 28（a）〕，如果材料比较薄，激光束焦点需放在工件

表面的上方[见图 28（b）]。这样的安排会让打出来的小孔上下大小基本上一致，不出现“桶状”的小孔。

用激光在材料上钻孔，钻出的小孔质量不仅非常好，特别是在打大量同样的小孔时，还能保证多个小孔的尺寸形状统一，而且钻孔速度快，生产效率高。所以，除在电子工业生产中用激光打孔外，其他许多工业生产部门都在采用，比如普通香烟过滤嘴上的小孔、喷雾器阀门上的小孔，也在采用激光加工。喷雾器罐和瓶子颈部都有一个用来控制压缩物质（比如除臭剂、油料或者其他液体）的流量，阀门使用的性能就由喷雾器上这只小孔来决定了。这只小孔的直径为 10 微米到 40 微米，用其他机械加工方法不那么好做，用激光来加工，能保证质量，每小时还可以打 4 万个小孔呢！

焊接

这也是机械加工中少不了的一道工序。焊接的办法现在也不少了，锡焊、电焊、孤焊、氩孤焊、电阻焊等，它们的工艺成熟，焊接质量也能保证。不过，在现代工业生产中，常常会遇到这样一些要求的焊接，被焊接的元件尺寸很小，焊接精密程度非常高，或要求在焊接的元件上不能留下任何污染物质；或者焊接环境比较恶劣（比如遇火容易发生爆炸）。采用前面谈到的焊接技术，遇到这些焊接都感到困难比较大，在这个时候用激光束来焊接或许是最好的选择。

激光束照射在材料上，会把它加热至融熔，使对接在一起的元件会接合在一起，即实现了焊接。因而用激光焊接是不需要任何焊料的，这自然也就排除了使焊接元件受污染的事；其次，激光束可被光学系统聚成直径很细的光束，换言之，激光可以作成非常精细的“焊枪”，做精密焊接工作；还有激光焊接与元件不发生直接接触，亦即这是非接触式焊接，因而材料质地脆弱也不打紧，还可以对远离我们身边的元件作焊接，也可以把放置在真空室内的元件焊接起来。因为激光焊接有这么一些特点，所以它在微电子工业中尤为受欢迎。

超大规模集成电路单位面积上的电路图形密度高，输入输出线的数目多，引线之间的间隔又很小。因此，封装集成电路的工作很精细。现在是采用一种所谓载带自动键合的技术作封装，它也算得上较为先进的封装技术。但它依然存在这么一个缺点，即在键合过程中因为存在压力和相当高的温度（约 450℃），容易引起集成电路发生热损伤和机械损伤，降低成品率。现在激光科学工作者试验用激光进行封装焊接，即用激光的能量瞬时让键合点加热而熔合。因为激光加热是非接触的，不产生机械压力，不会对电路产生机械损伤；又因为加热点仅仅限于在键合点上，热效应对其他部位影响很小，也就可以排除对电路的热损伤问题。用了激光焊接方法后，大幅度地提高了产品的成品率。特别是对于热敏性高和易碎的蕊片（比如 GaAs 蕊片或非常薄的硅片），采用激光封装后提高产品合格率更明显。

精细刻线

在现代的工业生产中，常常遇到要求在材料上刻出一些宽度极细线条的工作。比如制造大规模集成电路时，就需要在硅片上刻极细的线；精密仪表上的刻度盘，要求刻极细的线。做这些工作用激光的话，准能制出宽度窄、条条刻线粗细均匀划一的线条。

在半导体材料上制作的晶体管、电阻、电容和连线，现在是采用光学方法在材料上刻线制作的，这项制作技术叫光刻，制作过程大体上是这样：先将电路图形放大，然后用照相制版方法把电路图制成掩膜版，再把它贴在涂有光刻胶的基片上。曝光后把基片显影、烘干、腐蚀，然后把光刻胶去掉，便得到了电路图形。整个制作过程要做大量细致的工作。现在用激光代替普通光源来做这项工作，不仅可以提高精密程度，而且工序也大大减少。用激光的一种做法是，用激光束照射放在卤素气体中的硅片。它被激光照射的部位将与卤素气体发生光化学反应，产生腐蚀作用；而没有受到激光照射的部位，不发生光化学反应，没有受到腐蚀。激光束在计算机的控制下按照电路图样走动，在硅片上便刻划出电路图来，完成刻划电路图工作只要一道工序。

刻出的集成电路密度和刻线尺寸有密切关系。在 1970 年，刻线尺寸设计标准是 10 微米，相当于在一根头发丝大小的截面上制造出 5 个晶体管；到 1985 年，刻线设计标准提高到 1 微米，便相当于在一根头发丝大小的截面上制造出 500 个晶体管了。科学家估计，到 2000 年，刻线标准将提高到 0.1 微米，此时的集成电路就相当于在一根头发丝大小的截面上制出 5000 个晶体管。因为光波有衍射效应，它妨碍了我们用光学系统聚焦后能得到的最小线条尺寸。用波长 λ 的激光进行光刻，能够得到的最小线条宽度 d 为

$$d=K\cdot\lambda/NA$$

公式中的 K 是由光刻材料和所用的设备所决定的一个常数，其数值在 0.65～0.8 之间，NA 是成像透镜的数值孔径，现在生产中使用的透镜系统的数值孔径约为 0.55。所以，要提高刻线标准，提高集成电路密度，需要发展输出短波长的激光器。在表 2 中列出随着使用的激光波长缩短，能刻划制造出的动态随机信息存储器的容量变化情况。

表 2 不同激光波长能刻划制造的动态随机信息存储器

容量（mB）	4	16	64	256
激光波长（um）	436	365	248	193
年份	1992～1993	1994～1995	1998～1999	2000

用来制造图形小于波长的光刻装置，它能产生的聚焦深度很浅。所以，用它在基片上制作某一层集成电路时，必须是专门为制作这一层设计特殊参数的设备装置，在制作另一层的图形时，又得使用有另外一套参数的装置。这么一来，在基片上制作的集成电路层数增加，所用的生产线长度也增加，相应地建立这条生产流水线的投资也增加。按现在的标价，制作刻线宽度 0.1 微米的蕊片的生产线，约需 2000 万美元。这么高的投资金额，很难为普通的制造公司所接受。解决这个问题比较好的办法是利用 X 射线波段的激光。X 射线波段的激光聚焦景深大，所以，用同一部 X 射线激光刻线装置，有可能在基片上制造集成电路中所有各层的图形。因而生产线长度可以缩短，投资可以大大降低，估计只要 200～300 万美元。

修正集成电路

我们知道，从生产线上生产出来的产品，总会由于这

需要全本请访问 www.ertongbook.com

个原因或那种原因，使得有部分产品出现一些缺陷，变成了次品。制造集成电路也不例外，特别是制造集成元件密度很高的电路，每个电路出现缺陷的几率也在增加，导致产品合格率下降。比如，制造 64K 随机存取存储器的蕊片，产品合格率只有 10%左右，而制造集成元件密度更高的蕊片，比如 128K、256K 的蕊片，产品合格率更低。为了降低生产成本，必须采取一些手段，对有缺陷的电路进行修正，提高产品的合格率。但是，在微型元件高度密集的电路上查找有缺陷的元件，并把它修正，那是一件十分精细的工作，不那么容易做的。科学工作者经过努力，现在总算找到了一个修正办法，称为“ 激光余量元件修正技术 ”的方法能够比较好地对集成电路作“ 补救 ”，从而提高产品合格率。做法大体上是这样：在制作集成电路时多制造 3 至 4 排和列元件（它们就是余量元件）。对生产出来的集成电路成品进行检测，看看它们当中的各排和各列的元件是否存在缺陷。如果发现其中的某一排，或者某一列的电路上存在缺陷，就用脉冲激光束把这一排（或者列）整体切除（实际上也就是用激光的能量把它们与电路网烧断开），然后再用激光从余量元件中把一排（或者一列）元件接上电路网，替代被切除去的排（或列）。用这个办法之后，可以让制造集成电路的合格率提高 1.3～30 倍。

掩膜修正

制造大规模集成电路需要掩膜。在今天，制造掩膜的技术已经达到比较高的水平了。不过，制造出来的掩膜中有一部分仍然会或多或少地存在一些缺陷。比如在非透明区域上出现一两个小孔，或在透明区出现几粒非透明小点（比如小尘粒）。掩膜多次使用过之后在它上面也会出现这些缺陷。一块用来制造大规模集成电路的掩膜上面有几百万个图形，造价不低（约 2000 美元）。如果生产掩膜的产品合格率低，生产的成本也提高，售价也就提高；制造集成电路的厂家如果更换掩膜过快，同样也使成本上升。所以降低集成电路的生产成本和价格需要设法对有缺陷的掩膜进行修正，做这项修正工作也是十分精细的。激光科学工作者经过分析，认为采用激光技术可以胜任这项修正工作。用光学系统聚焦起来的激光束，它的直径可以细如针头般大小。使用这细小的光束作修补，也犹如在用微型绣花针在做修补工作，可以在掩膜上进行精细的修正，让它能继续使用。

用激光是这样来做修补工作的。在掩膜上透明区的那些不透光的小颗粒，用激光的能量把它加热而汽化掉；对于在非透明区上的小孔，采用激光化学气相沉积技术，在小孔的位置上补一点非透明材料。现在，激光修正技术已成为制造集成电路生产上的必要技术之一。

精密修正电阻值

金属膜电阻、碳膜电阻、厚膜电阻、薄膜电阻等，它们是光电子工业产品大量使用的基本元件，它们的质量将直接影响制造出来的电子设备质量。但是，在生产线上生产出来的各类电阻器，它们的电阻数值总存在一些误差，而且误差数值往往还不低，可达 15%～20%，离实际应用的要求相差比较大（实际使用的电阻器要求其电阻数值误差为±1%左右，某些应用要求的误差还更低）。所以，从生产线上生产出来的电阻器，需要对它们的电阻值进行修正。用激光来做这项修正工作也很合适，据认为它有操作简单易行，修正精度高的优点。

做法是在制造电阻器时先让它的电阻值比实际数值稍微高一点。然后用精密电路（比如惠更斯电桥）精密鉴测它的电阻值，同时用聚焦成细束的激光照射这个电阻，用激光的能量把电阻器上的膜层材料一点一点地汽化掉，相应地它的电阻值也在一点一点减小。直到电阻数值达到产品标准值就停止激光照射。经过修正的电阻器，其电阻值精确程度可以达到很高。对于低电阻值（小于 100 欧姆）和高电阻值（电阻值大于 100 千欧姆）的电阻器，精度可以达到 0.1%；对于电阻值中等的电阻器，精度可达 0.02%。这项修正工作可以在生产线上进行。完成修正 0078 的速度快，每小时可以修正 4～7 万只。

打标记、刻标度

生产出来的产品元件等需要在它们上面打上各种标记，比如产品名称、规格、生产日期、生产厂家等。普通的工业产品可以用印刷丝网在产品上印上这些标记，或者用机械刻划方法给刻上这些标记。但是，对于一些微型电子元件，比如大规模集成蕊片，微小电容和电阻、晶体管等，它们的面积有的只不过几平方毫米，要在它们上面打上标记，还要求这些标记清晰可见，不容易被抹去，用前面说的这些方法就不那么容易做到了。科学工作者说，这大概也只好用激光来做。

用激光在产品元件打标记，分两种情况采用两种做法。如果打的是固定的标记，比如商标、厂名等，一般是使用预先刻好标记的模版，用光学系统把它成像在元件上，然后用激光按照图样进行刻划。如果是在产品上打可变的标记，比如产品的流水号、产品的规格等，就预先把需要打的标记信息编成程序，输入到计算机，然后由计算机发出指令，控制激光束在产品上扫描刻划。用激光在产品上打标记，速度很快，单台激光打标机一天可以给 100 万只小元件打标记，而且打的标记线条很细，标记符号很小，大小约为 100 微米。打完标记的元件，它的性能也不会受到影响。

量具面盘上的刻度指示，过去也是用丝网印刷上去的。用这个办法制造出来的量具，一般来说量度的误差比较大。当然，也能生产出测量精度高的量具，但需要反复多次校准和变换刻度稍有变化的盘面，直到所用的刻度盘和量具特性达到最满意的配合，才能让量度误差达到设计要求。这么一来，生产一只量具要花比较长的时间，生产成本也就比较高。用激光来给面盘刻度，事情就会简单得多。首先在量具上安装空白面盘和指针，然后一面校准，一面用激光在面盘上刻度。用这个办法一次就可以生产出精度合乎要求的量具，大约可以比往日的做法节省 50% 的人力和物力。此外，激光刻出的刻度线条窄，也解决了国际规范问题。

快速制造模型

机械制造、医学、建筑、美术等行业，常常需要制作立体模型。常用的制作方法有注塑和用车、铣、刨、磨等机械加工制成，制作一具模型要花比较长的时间。如果要求模型内部有比较复杂的结构，用机械加工方法加工还相当困难。因此，制造一只模具要花比较高的成本。现在激光科学工作者采用激光来制造模型，制造工作简单、轻松得多了。不需要车、铣、刨、磨等机械加工，就能造出结构复杂的模型。

用激光制造模型时用的材料是液态光致凝固性预聚物，即它在吸收了紫外波段的激光能量后便发生凝固，变化成固体材料。把要制造的模

型编成程序，输入到计算机。激光器输出来的激光束由计算机控制它在模型材料上扫描刻划，在激光束所到之处，原先是液态的材料凝固了起来。激光束在计算机的指挥下作完扫描刻划，一具模型也就造了出来。所以，用这个办法制造模型，速度快，造出来的模型又精致。

精密计量

加工出来的各种零件，它们能不能配合使用，配合的精确程度，决定着制备出来的设备的精密程度，也决定着它们能不能相互配合使用。曾经发生过这样的停产事故：一家工厂的一些车床要更换螺丝杆。从外加工送来的丝杆安装上去后，发现尺寸不匹配，达不到生产精度的要求，只好又卸下来重新去加工。既浪费加工费，还不得不停产了几天。能让不同生产者生产出来的元件“密切”配合的“保证人”，那就是计量工具。计量工具的量度精度要高，它起码要比加工精度高，才有把握“监督”加工精度是否达到设计标准。现在不少加工的精度要求达到 0.1 微米，显然，我们必须要有量度长度的误差小于 0.1 微米的计量尺子。普通的尺子很难达到这个水平，科学家认为，“光子尺子”精度高，用它们会达到这个要求。开掘隧道、坑道，建造高层建筑，安装大型机械设备，总是需要一根“准直线”。准直的精度决定着开掘的坑道的准确程度。作长距离的地下开挖，准直方向所握不好，会“失之毫厘，谬之千里”，会使开挖工程蒙受巨大损失。光是直线传播，用光束可以做成非常好的准直线。不过，“光子尺”、“光束准直线”虽好，它真正能实用，真正发挥了作用，还是在激光器发明之后。用激光做成的“光子尺”，可以量大件物体的尺寸，量度精度达到 0.005 微米；用激光做成的准直线，1 公里远不会差 1 毫米。

精密的光子尺

我们常常用尺子量度长度。普通尺子量度长度的精确程度不高。其实这也不能全怨制造尺子的，作为长度基准的量原先的精确程度就不高。最初人们是采用经过巴黎子午线的四千万分之一取作 1 米长度的。由于地球子午线本身就难以精确测定，因此，以它为基准定出来的标准尺，自然也就有比较大的误差。后来又制作了国际标准尺，俗称米原尺，它是一根用铱铂合金制成的棒上面两条细线之间的距离。虽然铂铱合金的热膨胀系数小，随温度变化出现的伸缩变化量不大，但总存在一些变化，不能满足现代化工业生产量度长度所要求的高精密程度。而且，各国与米原尺进行比对也不方便，复现的精度不够高。

进入 20 世纪，人们在对原子分子物理的研究中发现，量子效应比宏观现象具有更好的稳定性。比如，在特定条件下，原子发射的一些光不仅频率（或波长）非常稳定，重复性也相当好，十分适合做计量单位。于是，在 1960 年第 11 届国际计量会议上通过采用光波的波长来定义 1 米的长度，规定 1 米的长度等于氪原子发射的红光波长（605.7 纳米）的 1650763.73 倍。激光器发明之后，我们得到了单色性比任何其他光源辐射都好的光辐射，用激光做尺子，它的“刻度”精度会非常高。同时，采用特殊方法制造的激光器，它们输出的激光的波长数值又是极为稳定，只要按照相同的条件制造的激光器，在相同的工作条件下运转，各个激光器射出的激光波长会准确一致。因而，用激光波长做尺子，它的长度会极为稳定，复制精度极高。国际计量会议已推荐 He－Ne 激光器输出的激光波长作为长度基准。

精密测量长度

我们知道，光学干涉方法测量长度是最为精密的，测量精度可以达

到波长的 1/100，也就是说，如果使用的是可见光，那么量度精度可以达到 0.005 微米！不过，用普通光源发出的光波来量度，实际能达到的精度低于这个值。因为普通光源的相干性比较差，用它的光辐射形成的干涉图并不清晰，干涉条纹粗，量度条纹间隔的精度低。此外，由于它的单色性差，能够量度的有效长度短，实际使用时便受到比较大的局限性。道理是这样的，光波的波长短（可见光的波长是 500 纳米左右），用它做尺子量一件宏观物体的长度，需要量许许多多次。比如用波长 500 纳米的“光尺子”量 1 米长的物体，就需要量 200 万次。问题是光源发出的光辐射并非就只有一个波长，实际得到的光辐射是包含在波长间隔△λ以内的许许多多个波长，这个波长间隔便是衡量平时我们常说的单色性的物理量。间隔△λ越小，这光辐射的单色性越好。出于这个缘故，我们在用波长为λ的光波做尺子量度时，其实是在用一束长度参差不齐的尺子在量度，其中长度最长的尺子的长度是λ+△λ/2，最短的尺子长度是λ—△λ/2。这么一来，在用波长为λ的“光尺子”对物体量度一次时，出现的测量长度误差是△λ，量度 2 次时累计的测量误差是 2△λ，如果对物体量度到 N 次时，累计的测量误差已达到波长λ，亦即已经和“光子尺”本身的长度相同，那么，再往下量度下去就失去意义。或者说，用波长λ，单色性△λ的光子尺，允许最大量度次数 N 由下面的式子计算：

$$N=\lambda/\triangle\lambda$$

相应地，允许量度的最大长度 L 是

$$L=\lambda N=\lambda^2/\triangle\lambda$$

在各种人造光源中，用氪气体同位素 ^{86}Kr 做成的气体放电灯，它发射的红光（波长 605.7 纳米）的单色性算是最好的，它的波长间隔△λ只有 0.00047 纳米，有单色性之冠的美称。就是用它来做尺子，最多也只能用来量度 38.5 厘米的长度，再长一点的物体，就不能用它来量度。激光的单色性非常好，以我们通常见到那种输出红光的 He－Ne 激光器来说，它的波长间隔△λ约为 10^{-8}（亿分之一）纳米，比“单色性之冠”还小 1 万倍，用激光做光尺子，可以有效地量度几公里，甚至几十公里长的物体。

现在，已制成多种用激光波长做尺子的测量仪器，比如激光测长仪（计量室内使用的长度计量仪器）、激光丝杆动态测量仪（测量丝杆产品等级的仪器）、激光线纹干涉仪（检测标准尺寸或者各种标准线纹尺的长度计量基准仪器）、激光量块干涉仪（检定各种等级块规的专用设备）、激光平面干涉仪（精密测量光学平面度、平板微小楔度的仪器）。这些仪器的测量精度高，比过去使用普通光源时的精度高 1～2 个数量级，而且测量手续简便，完成测量花的时间短。

除了测量直线的长度之外，用激光也可以精密地测量小孔径的尺寸、细丝直径尺寸、微粒直径的尺寸。这些测量工作在生产上是很需要的，做好这方面的测量工作，会给我们带来好的经济效益。比如，各种发动机汽缸内燃料雾化过程中颗粒的大小，它会直接影响发动机的工作效率。准确测量出颗粒尺寸，我们心中就有数：这台发动机能达到的效率会有多高，是否需要对雾化过程作改进等。同样地，水煤浆中煤粉颗粒尺寸大小还决定了它的燃烧值，水泥的标号则是根据它的颗粒大小标

定的。测量颗粒尺寸和它的空间分布，用激光来作测量，会获得比较高的测量精度，而且测量手续简便。利用微粒对激光产生的衍射图，或者利用微粒对激光产生的多普勒效应，便可以知道微粒的直径、微粒的空间分布以及微粒的运动速度。

探测极微量物质

测量混在物质中极少量的杂质成分，用光谱方法是最精确的了。早在 16 世纪，用光谱方法就能探测出三百万分之一克的物质含量。这个量用现在最精密的天平也称不出来。今天，光谱技术引入了激光技术，探测能力又获得极大的提高，只有 10^{-20} 克的物质也能被激光光谱技术发现出来。

在 1963 年，科学家在研究激光作用在固体材料表面上发生的物理过程时，发现由激光从材料中蒸发出电子、离子和中性原子，用 0.2 焦耳的激光能量照射，从表面上直径约 150 微米、深 125 微米的区域内，蒸发出来的原子数目就有 2×10^{17} 个。如果当中有 50%的原子被激发到高能级，那么，它跃回基态时发射的光辐射能量会达到毫焦耳，这个能量值用普通的探测器就可以准确测量出来。于是科学家就发觉，利用这个现象可以发展成一种灵敏度很高的探测技术。经过努力，果真成功地发展了灵敏的激光光谱技术，比如激光离子质谱技术、激光微区发射光谱技术。这两种技术除分析灵敏度很高外，还有如下一些优点：首先，不需要预制分析样品，通常的物理分析和化学分析，以及普通的光谱分析技术都需要预先制作好样品才能进行分析。这两种激光光谱技术则不需要这么做，分析时只需用激光束照射一下要分析的物体，然后用分光系统测量激光在物体上蒸发出来的原子的光辐射，便可以获得物体的光谱。打在物体表面上的激光光斑可以非常小（可以小于 1 微米），打的深度也不要求深，大约只有 1 微米就够了。所以对这种物体分析完之后，用肉眼是看不出在物体上留下什么痕迹的，即使用放大镜来看，不告诉您也不容易发现用激光照射的地点。由于有这个特点，所以，对文物作成分分析，用这种分析技术最合适。在湖南出土的两把古剑，就是用这种光谱分析技术找出表面的物质成分，揭开它们埋在地底下 2500 多年不生锈的秘密。其次是，分析灵敏度极高，只有 10^{-20} 克的物质也能给显示出来。这个特点在公安刑侦工作中也很有用。刑侦过程往往也就是靠分析从现场上留下的微量物质成分，帮助破案的。在安徽省一个市，有件谋杀案件的刑侦工作一度陷入困境，后来借助这种光谱分析手段，分析了遗留在衣领上的丁点血迹的成分，才迅速查出真凶，破了案子。

用激光离子质谱分析技术能分析的各类物质范围很宽，在化学元素周期表上列出的所有元素，从最轻的氢原子，到 105 号元素，都可以用这种光谱技术分析；气体的、固体的、液体的、有机物的、无机物的、药物的、生物的，都可以对它们进行分析。

精细的速度测量

在工业生产、科学研究实验中常常遇到速度测量的工作。比如，测量卫星运动速度、炮弹飞行速度、各种发动机尾部喷出气流的速度、水库中泥沙沉降速度、人体内毛细血管内血流速度等。在航天航空工业中，设计各种飞行器的过程中需要做风洞实验，风洞的流场、漩涡结构及其破碎过程，都涉及到速度测量。测量人体血管内血流速度、流动方向、

需要全本请访问 www.ertongbook.com

流速的变化，可以动态地显示诸如因心脏瓣膜关闭不全、狭窄、分流等导致的异常血流，帮助医生对心脏病情况作出正确判断。

利用激光技术可以准确地测出物体的流动速度。在各种激光测量速度的技术中，以激光多普勒测速技术最为常用。这种测量技术是基于奥地利物理学家多普勒在1842年发现的一个现象——后来以他的名字命名的多普勒效应。当波源与观察者作相对运动时，观察者接收到的波动频率与波源发射出来的频率不相同，出现一个频率位移。多普勒发现这个效应时仅限于对声波，后来赫兹于1888年在实验室产生了电磁波后，发现多普勒效应对电磁波也适用。假定光源相对于观察者的运动速度为υ，光源发出的光波频率为f_s，那么，接收器接收的光波频率实际上是f，它的数值由下面式子计算

$$f = \frac{cf,}{c - v\cos a}$$

式中的c是光速，a是光源的瞬时运动速度与光源和接收器连线之间的夹角。因为物体的运动速度总是比光速小许多，所以，上面的式子又可以简化为

$$f = \left(1 + \frac{v}{c}\cos a\right) f_s$$

或者写成

$$(f - f_s) = \triangle f = \frac{vf_s}{c}\cos a$$

式中的△f称为多普勒频率位移。因此，我们如果是仪器测量出从物体上反射回来的光波频率与原先光源发射的光波频率相差的数值△f，就可以知道物体的运动速度。

用激光多普勒效应测量速度的优点有好几方面：首先，它是非接触式测量，测量过程中对测量物体的行为不产生干扰，如果是测量气体或者液体的流场，测量过程中对流场不产生干扰，而且也适合于在恶劣的环境中，比如对有强腐蚀性的液体、对高温高压气流的测量。其次是测量速度范围大，可以测量从每秒零点几毫米到每秒几公里的速度，这是普通各种测量速度的办法所不能比的。第三是测量的空间分辨率高，目前已超过10^{-4}毫米[3]，可以

测量直径10微米、深度10微米的小部位的流速，因此，对于流体边界层、簿流层流体、狭通道流体的流速测量，用这种方法测量最有效。

不发生弯曲的准直线

我们会见到过，建筑工人在砌墙时都贴住墙壁挂一只下端系着重物的线，它叫做垂直线，有这根线做参考，砌出来的墙就垂直，不倾斜；工人在挖水管前，也先在地面上拉一根线，然后沿着这根线开挖，这根线叫准直线。类似地，安装轮船发动机主轴、安装大型发动机组的转子、开挖煤矿的坑道……，也都需要有根准直线才能开展工作。用根在下端系只重锤的线，或拉一根直的铁丝做垂直线和做准直线，因为线段本身的重量会引起弯曲，或者风吹引起它的漂移，准直的精度不会很高。而且，沿着这样的一根线进行作业往往也不那么方便。光束是直线传播的，而激光的亮度高，是一根天然的好准直线。光束本身无重量，不会弯曲；又不怕风吹，用它做准直线，准直的精度又会很高；而且在它的指导下

作业方便、工作的速度快。

大型汽轮机组安装时，各个机子的转子中心线应在一条直线上，以前是靠拉根铁丝作中心线的。上海一家安装公司在安装 30 万千瓦汽轮机组时，采用激光准直，结果缩短了工期，相当于多发电 2 亿度。陕西省一家基础公司采用激光准直指导开挖矿井，加快了开挖的速度，曾两次创造斜进日掘进长度的世界记录。

造船时很多工序也需要准直，比如船只中心划线、桅标定位、胎架划线、主轴系统安装等，现在采用激光做准直，准直精度比过去提高了一个数量级，工效提高了 2～60 倍。造船的工人师傅说，他们现在的工作离不开激光了。

激光束是直线，本身亦没有重量。虽然是一根好的垂直线和准直线，但要用好它，提高它的准直精度，也还是有一些改进工作要做的。光束在大气中传播时会受大气的扰动而发生漂移；激光的方向性虽然很好，但总存在微小的发散角，传播过比较长的距离之后，就会发现它一头细，一头略大了。这些情况都会影响它的对准精度。激光科学工作者现在也想了不少改进办法，比如，把激光器输出的激光束再通过一只望远镜之后发射出去，能够进一步减小光束的发散角。普通激光器输出的光束发散角约为 10^{-3} 孤度，利用加望远镜的办法可以使它的发散角减小到 10^{-5}～10^{-6} 孤度，1 厘米直径的光束传播过 100 米，粗细只发生 1%～10%的变化。如果用称为波带片的光学元件配合准直，能确保到达远处的光束中心不发生漂移，牢牢对准在一个点上。现在的激光对准技术已达到相当高的精度，在 3 公里的长度上进行对准，误差仅 0.2 毫米。

精明的检验工

生产出来的零件设备，在出厂之前都需要对它们做“ 验明正身 ”的工作，看看它的尺寸是否合乎要求，表面是否光滑，里面有没有缺陷；运转性能是否合乎设计要求等 ;设备使用时间长了，会不会出现“ 毛病 ”，也需要对它们作“ 体检 ”。激光是一双精明的“ 眼睛 ”，它能明察秋毫，协助我们做好各种“ 检验工作 ”。

查找劣质产品

您或许碰到过这种倒霉的事，买回来的电视机看不了几天就坏了；买回来的手表没几天就不走了。这些是不合格的产品。它们怎么会溜到市场上来？这和检验产品工作不完善有一定联系。产品检验工作是判断产品好坏的“ 眼睛 ”，名牌产品生产厂需要一双明亮的“ 眼睛 ”帮助它们找出“ 坏产品 ”，维护它们产品的好名声。说实在，现时许多产品检验工作还是靠人眼观察鉴别，漏检率比较高，难免有不合格的元件“ 漏网 ”，而且又不能与自动化生产线相配合，检验工作劳动强度大，工作很辛苦，检验速度也慢。激光科技工作者说，利用激光技术可以帮助我们改进检验工作，而且可以做到在生产线上对每件产品逐一“ 验明正身 ”，劣质产品别想逃过去。用激光在生产线上照射产品，根据从它们表面反射回来的光束形成的干涉图，或由它们产生的衍射光束形成的衍射图样，就能够准确地表明产品表面有没有针孔、压痕、裂纹、汽泡、条纹、斑点等缺陷，生产磁带、滚珠、胶片、金属箱、纺织品、玻璃制品等厂家，用这种方法帮助检验，有把握保证自己生产的产品质量。

电子线路生产厂也可以用激光帮助质量检验。一块印刷电路板上布满密密麻麻的焊点，即使采用比较先进的波峰焊接机进行焊接，有缺陷的焊点出现的几率也有千分之一，或者说，一块印刷电路板上出现 1～2 个有缺陷的焊点是常有的事。然而，用这样的电路板装配起来的电子仪器设备，它们的工作性能就会受到影响。所以，对电路板需要作质量检查，找出有缺陷的焊点，并把它修正。往日这种检查工作主要是靠有经验的工人察看焊点表面特征，比如焊点表面光滑程度、颜色、焊点与引线浸润情况等进行鉴别的。这么做也可以从中查出一些有缺陷的焊点，但工作效率比较低，检查的可靠性还受检查人员的经验、工作状态等因素的影响。如果用激光来做这项检验工作，就会省事多了。

经光学系统聚焦的激光束间断地扫描照射焊点。焊点在受到激光束照射时温度上升，激光束移开后温度慢慢下降。根据热辐射的原理，被加热的焊点也产生热辐射，辐射强度分布和焊点的温度变化有关系，而焊点的温度变化状况则又和焊点本身的特征有联系。比如，焊点的焊锡过少或者虚焊，在相同的激光能量作用下与别的焊点相比较，由于它们被加热的焊料质量少，所以温度升得高一些了，相应地产生的热辐射强度也高一些；而激光移开后，这些焊点的温度下降也更快一些，相应的辐射强度下降也快。用红外辐射探测器把各个焊点在激光束照射时产生的热辐射强度接受下来，与预先由合格焊点产生的热辐射强度分布曲线相对比，便可以判断被测的焊点的质量。这种测量对比工作是用自动控制系统做的，所以检验工作是快速进行的。

给大桥水坝体检

任何东西承受的负载都有个限度，长期超负荷最终会被压垮。1994年韩国发生一起大桥突然断裂，造成40多人掉下大江死亡的惨剧。后来查明原因是大桥长期以来超负荷工作，又没有及时采取治理而酿成的。怎样知道大桥“身体”是否健康？激光技术或许是最好的“体检”医生，上海的激光科技工作者采用激光技术对杨浦大桥做了“体验”，收到了很好的效果。杨浦大桥是世界一流的斜拉索大桥。大桥在设计过程中虽然经过严密的理论计算和大桥模型在模拟状态下的承载试验，但理论的结果和实际的情况往往不可能完全一致，模型的模拟承载试验也不可能同实物的实际承载完全相同。为了用好桥、管好桥，全面掌握大桥在实际承载状态下的运动规律，激光科学工作者用激光对大桥在各种非常条件下、恶劣条件下（比如夏天最热时、冬天最冷时、大风季节、大雨大雪时、大桥重载运行时、大桥高峰运行时）承载的挠度变化进行分析，取得了许多用过去常规测量方法没有得到的数据。

大型水库堤坝底下如果出现小洞；大型水力发电站蓄水池闸门底下出故障，不及时采取办法修整，会酿成大事故。我们的人眼看不见水下发生的事。用激光做成的水下电视，能让我们一览水下情况，察看有没有出现“异常”情况。如果有险情，凭着激光水下电视的帮助，在岸上的工程技术人员也就可以制定合适的抢险方案，以及指挥在水下的抢险人员开展工作。

用激光也可以帮助我们监视水力发电厂大型水库提坝是否因为年久而发生形变。如果它们和老年人一样也出现“弯腰”，那就需要及时采取措施，不要让它再弯腰下去了，不然就会缺堤，后果是不堪设想的。

用激光也可以让我们不用解剖样品，就看到产品内部有没有缺陷、裂缝。基于激光技术而建立的“无损检验”技术，现在是检查飞机轮胎、炮弹等质量非常有价值的方法。

激光制造

科学研究用的材料、生产用的原料，大多数都是人工制造的。材料制造技术是发展科学技术和生产技术的基础。激光是制造材料的新技术，利用激光可以制造出质量好、性能特殊的材料。

激光制造高温超导薄膜

光学元件的表面一般镀上一层光学薄膜，以改善它的光学性能。比如镀上高反射率膜，可以提高元件反射光的能力；镀上增透膜就可以减少表面对光的反射能力，而增加光束透过元件的能力。薄膜更是现代微电子器件制造的基础，集成电路、光盘，它们都需要在基质上镀一层薄膜。高温含铜氧化物超导体发现后，新型超导体器件的发展，也离不开薄膜技术。在基底材料上镀上一层薄膜的技术有蒸发技术、溅射技术、热化学气相淀积技术、分子束外延技术和化学外延技术等。现在，在这个技术领域中引进激光技术，发展了两种镀膜新技术，即脉冲激光淀积技术和激光诱导化学气相淀积技术，这两种技术能制造出质量更好的薄膜。

早在 1963 年，人们就发现激光束照射到固体材料靶时，有电子、离子和中性原子从固体靶表面跑出来，并在表面附近形成一个发光的等离子区。随后有人想到，如果将这些固体表面跑出来的原子（离子）在衬底上凝结，就得到了薄膜。这便是用激光进行镀膜的初期概念。到 1965 年，就有科学家成功地用激光制成了光学薄膜。

在 80 年代初的头几年,主要是利用近红外波段的激光,比如 Nd：YAG 激光和 CO_2 分子激光照射固体靶进行镀膜。经过研究分析对比，发现用这种激光来镀膜，其性质类似于使用电子束打击靶材料作蒸发镀膜，未见到用激光镀膜有多大的优越性。到 1987 年以后，人们开始用输出短波长激光的激光器（比如输出波长 193 纳米的 ArF 准分子激光器、输出波长 248 纳米的 KrF 准分子激光器）镀膜,制备出了高质量的 YBCO 和 BiSrCaCuO 高温超导薄膜。这以后，用短波长脉冲激光镀膜获得了迅速发展，据称，目前世界上有一半以上的高温超导薄膜是用这种方法制出来的。随着这门技术的发展，人们也探讨了这种镀膜技术的基本原理，总结了这门技术的优越性和发展潜力。

原子的电子吸收波长一般是在短波长区，或者说，固体靶材料对脉冲短波长激光强烈吸收，入射到靶面的激光被反射的很少，大部分被吸收掉。吸收了激光能量的靶材料温度很高，迅速升到蒸发温度以上。蒸发大量原子、电子和离子，形成一个等离子体。随后继续往固体靶入射的激光能量在通过这等离子体区时，被它强烈吸收。吸收了激光能量的等离子体温度急剧上升，体积迅速膨胀。激光脉冲结束后，由于等离子体密度分布梯度还存在，因此，它还继续膨胀。膨胀后的等离子体迅速冷却，其中的原子就在靶对面的衬底上凝结起来，形成薄膜。

用这个办法镀膜有好几方面的优点：

（1）只要入射的激光能量密度超过一定数值（它称为蒸发阈值能量密度，一般为 0.10～0.40 焦耳／厘米 ^{2}），各种元素都有相同的脱出率；而且蒸发出来的各种元素在空间有相同的分布规律。所以，得到的薄膜成分和靶材料的一样，这个性质使得这种镀膜方法很适合用来制备多元

化合物薄膜，或许还适宜用来制备含有挥发元素的多元化合物薄膜。特别是适合用来制造高温氧化物超导薄膜，因为它们的超导性能对组分非常敏感，不同化学配比，有不同的超导转变温度，现在利用激光镀膜技术，已制出高质量 Y 系、Bi 系和 Te 系高温超导薄膜。

（2）从靶材料表面蒸发出来的粒子，绝大多数沿着与靶表面垂直的方向前进，与激光入射的方向无关。所以，只要把衬底放在靶材料正前方就能够获得均匀的薄膜，用通常的电子、离子加热靶材料蒸发镀膜时，从靶材料表面蒸发出来的粒子在空间的分布与角度 θ 成余弦函数关系（这里的 θ 是粒子飞出的方向和靶面法线之间的夹角）。

（3）镀膜时靶材料消耗量少，靶材也可以做得很小，原则上只要比入射的激光束光斑大一点即可。所以，在制备稀有金属的薄膜或贵金属薄膜时，用这种镀膜技术是有利的。

（4）它不需要坩埚，避免了坩埚的污染，也不出现用其他镀膜方法时因为真空壁温度升高放气而造成的污染。

此外，还有镀膜速率高等优点。

另外一种激光镀膜技术叫做激光诱导化学气相淀积，它使用的镀膜材料不是固体的，而是气体混合物，选用的激光波长应是气体原子或分子的强度吸收波长。如果使用的是紫外波段的激光，激光波长应是在原子（或分子）的电子吸收带上；如果用的是近红外波段的激光，所用的激光波长应是在分子的振—转吸收带。这样做，就能让原子或分子吸收了激光能量以后，发生有效的光分解反应。因为这种镀膜技术是基于对气体原子、分子光分解形成的原子淀积在基底上而形成膜的，所以，镀什么元素的薄膜，就选含这种元素的气体分子化合物做镀膜原料，比如在基底上镀金属铝膜，选用的气体材料是 $Al(C_4H_9)_3$ 蒸气，它在激光的作用下将发生如下的光分解反应

$$Al(C_4H_9)_3 \xrightarrow{h\nu} (C_4H_9)_2 - Al - H + H_2$$

随后，$(C_2H_9)_2 - Al - H$ 与衬底材料表面发生表面反映：

$$(C_4H_9)_2 - Al - H \xrightarrow{\text{表面反映}} AlH_3 + \text{多丁烯}$$

$$AlH_3 \rightarrow Al + H_2$$

铝原子淀积在衬底上，形成铝膜。如果是镀介质膜，比如镀 SiO_2 膜，就先用短波长激光作用于 N_2O 气体，使它发生光分解反应，生成在激发态的氧原子，然后这个在激发态的氧原子同硅烷（SiH_4）反应，便生成 SiO_2 膜。整个制造过程用下面的反应式表示：

$$N_2O \xrightarrow{h\nu} N_2 + O^*$$

$$SiH_4 + O^* \rightarrow SiO_2 + 2H_2$$

用这个办法制造硅膜的速率很快，大约是每分钟 200 纳米。如果用紫外波段的激光对 SiH_4、Si_2H_6 或者 Si_3H_8 等气体进行光分解，也能在衬底上以很高速率形成非晶硅膜。

激光诱导气相淀积方法制造薄膜也有一些优点，首先，因为它是通过光分解过程来实现在衬底上淀积镀膜材料，没有加热源，因而也就可以使衬底保持在比较低的温度，避免材料因为温度升高而导致性能发生变化或结构上发生变化；其次，可以有选择性地在某个微小区域上淀积，

需要全本请访问 www.ertongbook.com