走进科学殿堂

清晰的纳米世界

——显微镜终极目标的千年追求

章效锋摇著

清华大学出版社
北　京

需要全本请访问 www.ertongbook.com

内 容 简 介

纳米世界前景诱人，但如果不能够看到这些纳米尺寸的物质，则一切设想都是空谈，纳米应用也将成为纸上谈兵。本书的讲授从物理学中最先认识的光的传播开始，历经折射与放大、光学显微镜的开发与完善、光的波动研究、电子显微镜的诞生及电子显微术的发展，直到可观察原子又可移动原子的扫描隧道显微镜的问世，同时穿插着物理大师的各种故事，体现了人类对不可知的微观世界的不懈探索精神。全书以探求微观世界的手段拓展为主线，兼对物理原理、应用范围及其他相关的发明作简单介绍，力图使读者对这部分历史的原貌有一个较为系统的了解，最终向读者展现了人类在眼见为实的信条下对显微术终极目标——清晰的纳米世界——的不懈追求。

版权所有，翻印必究。举报电话：[illegible]
本书封面贴有清华大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。
本书防伪标签采用特殊防伪技术，用户可通过在图案表面涂抹清水，图案消失，水干后图案复现；或将表面膜揭下，放在白纸上用彩笔涂抹，图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目（[illegible]）数据

清晰的纳米世界：显微镜终极目标的千年追求 [illegible]
（走进科学殿堂）
[illegible]

Ⅰ[illegible] Ⅱ[illegible] Ⅲ[illegible] Ⅳ[illegible]

中国版本图书馆 [illegible] 数据核字（[illegible]）第 [illegible] 号

出 版 者：清华大学出版社　　地　　址：北京清华大学学研大厦
[illegible]　　邮　　编：[illegible]
社 总 机：[illegible]　　客户服务：[illegible]
责任编辑：宋成斌
封面设计：常雪影
版式设计：肖摇米
印 装 者：清华大学印刷厂
发 行 者：新华书店总店北京发行所
开　　本：[illegible]　印张：[illegible]　插页：[illegible]　字数：[illegible]千字
版　　次：[illegible]年 [illegible]月第 [illegible]版 [illegible]年 [illegible]月第 [illegible]次印刷
书　　号：[illegible]
印　　数：[illegible]
定　　价：[illegible]元



简单说来，纳米只不过是一个普通的长度单位，就如同我们日常生活中所熟悉的千米和厘米一样。但是纳米所标记的长度之微小，的确是一般人以前所不太熟悉的。纳米中的纳字，译于英文的 nano，而 nano 又是由希腊文的 nanos 演变而来。nanos 本意为矮小或矮小的。1 纳米相当于 1 米的 10 亿分之一(10^{-9} 米)。形象地说，1 纳米大约相当于一粒细沙长度的 100 万分之一，或可说为人的一根头发的 10 万分之一。香烟雾气中的一粒微尘大小约为 1000 纳米。而在 1 纳米的长度上挤挤挨挨也只能排列不到 10 个原子。如果把一个原子放大到一个苹果那么大，那么用同样的放大倍数可将这个苹果放大到整个地球那么大。这么小的尺寸当然无法用肉眼辨认，甚至用最好的光学显微镜也力有未逮。

有人会问，这种小不点的尺寸与我们的生活有什么关系呢？答案是非常有关系，尤其是在今后的年代更是如此。纳米效应的神奇首先体现在材料物理性能的改变。当物体小到只有纳米尺寸时，物质的许多物理特征如力学、热学、电子学特性都会大大改变。有一个简单的比喻是，由 1 立方毫米的玻璃可推知整座玻璃山的性能，但当玻璃尺寸小到纳米时，一切却都不同了。纳米材料的应用前景是显而易见的。例如，在医药工业方面，除了已经发现将某些药粉颗粒减小

到纳米尺度可以改善疗效外，还可在纳米药物颗粒中掺入磁性物质后包在生物大分子之中，再利用外加磁场导航，将药物精确地传导至目标区域。此外科学家们还设想制造纳米机器人并与人体生物系统相结合，可使纳米机器人游走于人体血管网络中，疏通血栓，清除血管壁脂肪沉淀，杀死癌细胞等。在材料科学与工程领域，科学家们正在尝试各种技术革新或发明，以图制造出只有数纳米或几十纳米大小的构件，并由它们构成具有特定功用的纳米电路。

例如，现在已可用仅数纳米粗细的碳管制成电子仪器及计算机中必不可少的晶体管，在仅针尖大小的空间中就可排列高达10万个这种纳米晶体管。美国英特尔公司在2001年6月宣布采用与当今电脑芯片中相同的物理结构和材料制成尺寸仅20纳米的晶体管。如果用这种晶体管做成计算机，将能在眨眼的时间进行10亿次运算，也就是说在高速子弹穿越1英寸距离的时间内能完成400万次运算。而仅在一年之后的2002年8月，英特尔公司推出的Pentium 4(奔腾4)电脑芯片，在116平方毫米的面积上排有5500万个晶体管，时钟速度高达前所未有的每秒钟28亿次(2.8GHz)。制作这种芯片所用光刻技术已达130纳米精度。而到2005年之后，更可预期小于90纳米精度的技术将大规模投入使用。届时，芯片速度会进一步提高，而尺寸则继续减小。可以想像，用这种纳米技术芯片和其他纳米元件制成的微型计算机，不仅尺寸可以小到肉眼几不可辨，其运行速度和效率也比现代的普通计算机提高数百万倍，而能耗却可大幅降低到目前计算机能耗的几十万分之一。

在机械工程方面，现在已可用纳米技术制成只有数纳米大的齿轮并能进行啮合传动(图0-1是计算机模拟的用纳米碳管和苯环制成的纳米齿轮)。有了这些基本的组成单位，便可在将来制成纳米机器人、纳米探测器、纳米电子仪器，甚至各类微型武器，例如可放在孩子们口袋中的航空母舰及飞机等。这种设想虽然听起来有些疯狂，但随着世界各国对纳米技术及科学的大规模资金及人力的投入，一些幻想的实现已经不再成为疑问了。当

今许多国家纷纷行动起来抢占纳米技术的战略高地。日本已把纳米技术列入新的5 年科技基本计划的研发重点；德国把纳米技术上升为新世纪科研创新的战略领域；在美国，政府方面于2000 年底推出的每年投资5 亿美元的国家纳米技术计划，更被视为一次新的工业革命的核心。实际上2004 年美国在这方面的投资已达8.5 亿美元，而且21 世纪纳米科技研发已在2003 年12 月被总统签字成为法律，以保证从2005 年起的4 年中这项国家科技发展战略能够获得足够的资金。我国政府已在2004 年拨款2.5 亿元人民币建设国家纳米中心，现已投入使用。一时间，“纳米热”遍及全球，新名词、新概念、新现象乃至新物质在世界各地不断涌现，以纳米技术和科学为领军的又一次产业革命已经隆隆启动。可以说，匪夷所思的纳米技术势必成为今后几十年科技发展的先锋。

当然，纳米世界虽然前景诱人，但一切梦想的实现还需要脚踏实地地从纳米技术的研发开始。纳米技术的含义很广，可简单地概括为制造具有纳米尺寸的材料(尺度小于100 纳米)并进一步将纳米材料单元组合成微型仪器的技术。显然，在整个纳米技术创新过程中，如果不能够看到这些纳米尺寸的物质，则一切设想都是空谈，纳米应用也将成为纸上谈兵。著名物理学家、1965 年诺贝尔物理学奖得主费曼（Richard P. Feynman）早在20 世纪50 年代就指出：“如果我们能最终发展出对我们所做的和要做的物质进

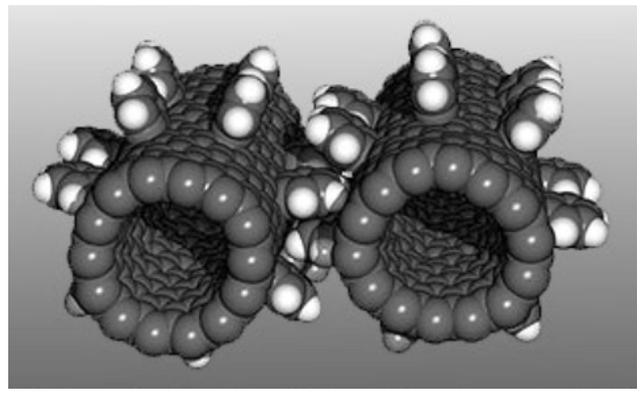


图0-1
电脑设计的由纳米碳管和苯环组成的纳米齿轮传动模型

需要全本请访问 www.ertongbook.com

行原子水平观察的能力，那将对解决化学和生物问题有巨大助益。而我相信这一能力的实现是不可避免的。”可见在当前的纳米革命中为了实现操纵纳米世界的目的，放大纳米物质并且将清晰的纳米世界呈现在人们眼前，成为现代纳米技术发展中不可或缺的基础环节。清晰的纳米世界，说起来只有七个字，但这七个字中包含了人类足足五千多年的艰苦而漫长的突破自身视觉极限的努力。从对光的基本认知，玻璃对光的折射而产生的放大作用，放大镜的发明，光学显微镜的开发与完善，电子显微镜的诞生及电子显微术的发展，直到既可观察原子又可移动原子的扫描隧道显微镜的问世，一再体现了人类对不可知的微观世界的不懈探索精神。本书将对这一激动人心的历史进程进行初步探讨。全书以突破微米分辨极限的光学显微镜、打破纳米分辨极限的电子显微镜，以及既可观察又可操纵原子的扫描隧道显微镜的发明及发展道路为主线，兼对物理原理、应用范围及其他相关的发明作简单介绍，力图使读者对这部分历史有一个较为系统的了解。限于作者的时间、精力以及知识范围，不可能在此涉猎到所有相关内容，敬请读者见谅。

书名《清晰的纳米世界》，是指显微镜的分辨率的一种境界。不过严格说来，现代显微镜早已更上一层楼，进入了更小的“埃”(十分之一纳米)的分辨领域。之所以仍使用“纳米”一词，主要是因当前纳米之风正盛，读者对纳米的概念均有或多或少的了解，便于从书名了解本书的主旨。

笔者于1986年在中国科技大学理论物理专业毕业后，经钱临照先生推荐到中国科学院金属研究所，在导师郭可信先生的带领下进入电子显微学领域。在将近二十年的潜心磨炼中，亲眼目睹了电子显微镜从笨重、机械和手动调节发展到当代的精巧电子控制和全功能化的发展过程。在由衷地赞叹人类智慧之伟大的同时，也对整个显微镜的发展历史产生了浓厚的兴趣。在广泛收集了各方面资料后，终于利用三年的业余时间完成此书。

本书为了兼顾科学普及、科学史两个方面，对有关科学内容的描述力求简明扼要，浅显易懂，使非专业人士并具初中以上学历者均可看懂。书

后附详细的参考文献和中英文重要人名对照表，便于深入阅读。

感谢妻子蒋娟帮助誊写稿件等的全力支持，也感谢父母多年来对作者事业及生活方面的无比关怀；感谢清华大学出版社宋成斌编辑在本书出版过程中的通力合作；还要特别感谢郭可信先生对本人踏入电子显微学领域的启蒙、引领和大力提携，以及热情地为本书作序并提出了许多宝贵的意见和建议。最后，谨以此书告慰笔者最为尊敬和怀念的外公钱临照先生，他在电子显微学和科学史方面的不懈努力精神对我等后辈是一种永远的激励。

章效锋
美国劳伦斯·伯克利国家实验室
2005 年 4 月



自从古希腊哲学家在两千多年前提出原子学说以来，能看到原子一直是人们梦寐以求的。俗云“百闻不如一见”，西谚也有‘Seeing is believing”，可见眼见为实是人类的天性。因此，两千多年来人们一直不遗余力地改善他们观察事物的能力。先是在17世纪借助光学显微镜看到细菌和细胞的微米世界。接着又在20世纪发明了电子显微镜、场离子显微镜、原子探针等，从而进入了病毒和纳晶的纳米世界，甚至能看到单个原子。近二十年来扫描隧道显微镜、原子力显微镜等又应运而生，不但使我们洞悉原子世界，还能通过操纵原子而改造世界，前景无限美好。本书就是从科普和科学史的角度沿着这三个层次展开的。

本书作者大学本科学的是理论物理，研究生阶段专攻电子显微学，后来又到国际上一些知名的电子显微学中心从事先进材料的研究，如德国尤利希（Jülich）研究中心，比利时安特卫普（Antwerpen）大学，美国洛斯阿拉莫斯（Los Alamos）国家实验室、劳伦斯·伯克利（Lawrence Berkeley）国家实验室，等等。因此他不但具有深厚的理论基础，又有高超的实验技能，从而能深入浅出地讲清楚各种显微镜的原理及关键技术。在科学史方面，作者从小就受他外祖父钱临照先生（钱先生是中国科学史学会第一任理事长，也是中国电子显

微镜学会第一任理事长）的教诲和熏陶，对显微镜的每一重大进展都要溯本求源，不仅要弄清来龙去脉，还要分析前因后果，一一娓娓道来，中间还夹有名人趣事，所以，有此爱好，本书写出来后，自然会令读者兴趣盎然，爱不释手。

显微镜是一种仪器，使用人往往只重视使用（即实验结果），而忽略仪器的特性，本书中有不少地方阐述实验技巧的重要性。例如图 2 - 4 所示的列文虎克(Leeuwenhoek)在 1673 年制造的只有钥匙大小的简式显微镜，分辨率竟高达 2 微米，可以看到一些他戏称的“ 小动物 ”(人的精子等)，把理论上分辨率高而当时实际上只达到 5 微米的复式显微镜远远抛在后面。因为这种简式显微镜简单便宜，自己制造的已达数百，每个都装上固定的标本进行反复的细致观察，有不少惊人的新发现，以致不少人误认为（包括一些书上误写）列文虎克是显微镜的发明人。又如作者在第 4 章中讲到的宾尼希(Binnig)和罗雷尔(Rohrer)是如何克服重重困难研制出扫描隧道显微镜的。我仍清楚地记得 1985 年我去澳大利亚参加该国的电子显微学会议时，宾尼希和罗雷尔的同事当场从裤兜里掏出一个只有巴掌大小的扫描隧道显微镜，所有在场的人无不瞠目结舌，谁也不敢相信就用这么一个结构简单、其貌不扬的玩意儿竟能看到原子！也正是由于仪器构造简单，才能在后来的十多年里发展成一个能测量多种物理和化学性能的扫描束显微镜家族(scanning probe microscopes,SPM)。

与 SPM 相比，透射电子显微镜则是价值上百万美元的庞然大物（见图 3-35)。它从 1931 年作为一个只有放大作用的简单仪器问世起，逐渐发展成不但能观察到原子，还能从标本的 X 射线和电子能谱得知其化学成分，从它的电子衍射图得知其晶体结构的全能仪器。这是纳米研究不可或缺的研究手段，也是本书中着墨最多的第 3 章。在该章之初，作者从伦琴(W.C. Röntgen)在1895年发现X射线和汤姆逊(J.J. Thomson)在1897年发现电子讲起；接着讲到劳厄(Laue)和布喇格(Bragg)父子在 1912 年发现晶体对 X 射线的衍射，电子的波动性[德布罗意(De Broglie)，1925]，戴维森(Davisson)

和汤普森(G.P. Thomson)在1927年分别发现电子衍射，以及贝特(Bethe)解薛定谔方程得出电子散射矩阵；中间还穿插着盖博(Gabor)一度研究过电子光学想造电子显微镜，终因顾虑电镜的机械稳定性达不到原子分辨要求而放弃了它，但他却在后来发现了激光全息。这一串近二十位诺贝尔物理学奖得主的贡献不但阐明了电子显微镜的理论基础，也是20世纪上半叶物理学史的回顾。

接着是一些电气工程师登场，仅凭着对在阴极射线管外边绕些线圈可以使电子束聚焦的理解，就真刀真枪地开始研制电子显微镜，其中关于发明权的争论最引人注目。这里边有西门子公司和德国的通用电气公司之争，有物理学家[鲁登伯格(Rüdenberg)抢先申请到电子显微镜的专利，但从未进行过研制]和电气工程师[鲁斯卡(E. Ruska)]之争，有鲁斯卡和他的妹夫也是合作者鲍里斯(Von Borries)的亲属之争，从欧洲战争前争到欧洲战争后，甚至诉诸法庭，闹得不可开交。最后还是因为其他有争议权的人都陆续自然死亡，鲁斯卡才得以在1986年八十岁高龄之际，毫无争议地获得诺贝尔物理学奖。

作者在这一章的结尾详尽地介绍了近几年来几个电子光学和电子显微学中心如何携手解决电磁透镜的球差和色差从而把电子显微镜的分辨率提高到接近0.1纳米的水平。这样的总结还是初次看到，可作为对此有兴趣的读者参考，不过这种武装到牙齿的电镜价值连城，非三百万美元不能买下，对大多数人来说是可望而不可及的。

我认为这本小书会把读者带进科学殿堂，进入纳米世界，继续进行千年追求，永无止境。

中国电子显微学会理事长　郭可信

2005年清明



第 1 章　往事越千年——人类视觉的延伸　1

第 2 章　风景这边独好——突破微米极限的光学显微镜　9

2.1　光学显微镜的发明　9

2.2　初探微观世界　13

2.3　显微镜光学　20

2.4　渐入佳镜的光学显微镜　26

2.5　20世纪的显微镜发展　41

结语：新的期望　49

第 3 章　不到长城非好汉——突破纳米极限的电子显微镜　51

3.1　呼之欲出　51

3.2　电子显微镜诞生　59

3.3　透射电子显微镜的设计及工作原理　84

3.4　电子显微镜中的像差　94

3.5　全方位追求　99

3.6　电子显微学派的兴起　111

3.7　勇攀高峰——高分辨电子显微术的发展之路　115

3.8　屡立奇功　141

结语：未来会更好　176

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第 4 章　无限风光在险峰——可移动原子的扫描隧道显微镜　179

4.1　费曼的梦想　179

4.2　神奇的隧道　182

4.3　迫近的脚步　186

4.4　攀登的足迹　190

4.5　工作原理　202

4.6　变种的威力　208

4.7　针尖上的实验室——SPM 家族　212

结语：拭目以待　225

总结语：眼见为实和显微术的终极目标　227

参考文献　229

中英文人名对照表　239

英文目录及简介（Contents and Introduction）　243

往事越千年

——人类视觉的延伸



自公元前1500年开始，人类即对光的折射现象有了初步的认识，此后经历了漫长的近三千年的缓慢发展，终于在公元13世纪发明了眼镜，迈出了制造光学工具的第一步。

人类对于宏观现象的探索一直是人类社会发展的一部分。应该说自有人类文明以来，这种探索就没有停止过。对于肉眼所能观察到的一切自然现象，人类从来都抱有极大的兴趣去探索及理解。研究的方法一般而言包括了观察、思考、实验、总结等步骤，其中又以对现象的观察为第一根本。如公元前中国战国时期墨翟(墨子，前468—前376，梁启超《墨子年代考》)的《墨经》(涉及光学力学)，希腊哲学家阿基米德(Archimedes，前287—前212)著名的阿基米德定理，公元后的意大利科学家伽利略（Galileo Galilei，1564—1642)的Eppur Simuove(英文意为Still It Moves。伽利略因这部否认地心说的著作而受到罗马天主教会迫害)，英国科学家牛顿(Isaac Newton，1642—1727)的《自然哲学和宇宙体系的数学原理》(简称“原理”,“Principia”,1687)，凡此种种对自然规律的高度总结，无不是以对现象的反复观察为基础。这种“眼见为实的基础在带给人类丰富知识的同时，也将

人类早期对自然规律的研究活动限制在了肉眼可辨的范围之内。在正常情况下，可被人的裸眼辨识的两点间最小距离大约是50微米(也就是0.05毫米)。若两点的距离小于50微米，则两点不能够被眼睛分辨，所见仅是一个笼统的较大的点而已。50微米是多小呢？它大概相当于人的头发丝的二分之一粗细。在我们常说的“明察秋毫”一词中的秋毫，泛指动物的纤毫，比人的头发丝更细数倍。从这个意义上讲，谁又能在真正意义上做到“明察秋毫”而不借助任何工具呢?

这里所说的工具范围很广，但最简单最普遍的就是我们今天使用的放大镜和显微镜了。这些工具的核心部分都是由具有凸起或凹陷表面的玻璃透镜制成的。从物体传来的光线穿过透镜时会改变传播方向，称为折射，从而产生对被观察物体的放大成像作用。

说起人类对光的传播现象的最初认识，可以追溯到3500年前。但对于光的本质的系统著述，中国战国时期的墨翟当为第一人。对此，我国著名物理学前辈钱临照先生在1942年对墨子论著中的科学研究部分详加考证并著《释墨经中光学力学诸条》一文。墨翟出生于木工世家，是战国百家争鸣时期一位伟大的学者、政治家、社会活动家和教育家，是墨家思想的创立人。墨家学派集七十一篇论文于《墨子》一书传留后人，经过两千多年坎坷，现在只得其中五十三篇。其中的《墨经》四篇（《经·上》、《经·下》、《经说·上》、《经说·下》）是墨子学术思想的中坚，是对当时由实践中获取的科学知识的总结。其中讨论的自然及社会科学问题涉猎广泛，包括有名学、形学、光学、力学及经济学。其中的光学部分共有8条论述。经钱临照院士详细解说，使

我们得窥全貌[1]。光学8条依次详细阐明了阴影的定义与生成，阴影与光的关系，光的直线传播性，光的反射性，物影大小与光源的关系，平面镜成像之物像关系，凹面镜成像之物像关系，以及凸面镜成像之物像关系。既有对现象的观察，又有设计的实验作证，前后连贯，循序渐进，已隐具现代几何光学之雏形。例如一个很著名的光学实验颇类似于现今针孔照相盒装置：在一个暗室的一面墙上开一小孔，另一人在暗室外对小孔而立，在阳光照射下，会在暗室内与小孔对立的墙上呈现倒立的人影，并由此现象得出“光之入照若射”的结论，即光线直线传播如射出的箭。《墨经》中虽未能明确提出如今所知的光学反射定律而令人稍有遗憾，但在距今约2400年前即对光的本质有如此独到的钻研与见解，使得《墨经》堪称为世界上最古老的光学典籍。与墨子同列春秋战国时代诸子百家的韩非也在其《外储说左·上》中记载了应算是当时世界上最早的幻灯光学实验——豆荚映画。故事说的是周国国君重金礼聘了一位可以在豆荚内极薄的薄膜上作画的高手，历时三年终于完成一幅画。可是国君却在豆荚薄膜上看不到任何画。画家指示寻一暗室，在朝阳的一面墙上凿一小孔，然后把薄膜拿到小孔处迎着阳光观看，赫然呈现五彩缤纷活龙活现的龙蛇鸟兽和车水马龙，博得龙颜大悦。

中国以外最早系统地谈论光学的则首推公元前3世纪的希腊数学家欧几里得(Euclid，墨子之后一百年左右)。他著有Optics(光学)一书，汇集并详论当时希腊人所知的光学知识。在书中明确提出了光的入射角与反射角概念，但未涉及反射定律。欧几里得其实最著名的著作是《几何原本》，当代的初等几何学乃源于此。而光学的反射定律则是迟至

公元11世纪由阿拉伯学者哈桑(Ibn-al-Haithan，又名Alhazen，962 — 1038)在其光学著作中首次明确提出的。此时距墨子时代又过了1500年左右了。反观中国自墨子之后，废黜百家，独尊儒术，使得在儒学当道的千余年间，光学研究方面一片荒芜。迟至明、清两代才陆续出现如明朝天启年间(1620 — 1627)教士汤若望(J.A.Schall Von Bell，1592—1666) 的《远镜说》，清朝道光年间(1821 — 1850)郑复光的《镜镜伶痴》及清朝咸丰年间(1850 — 1861)张福喜的《光论》等光学专著。因自明朝万历(1572)始至末世崇祯年间西方基督教传教士开始进入中国传教并带给中国丰富的西方科技知识，明末至清朝的中国光学著作是否受此影响尚待考证。但显然这些晚期著作大都涉足较浅，未能再有如墨子般的独创成就。

光除了反射性外，另一大传播特性就是折射性，这在前面已提及。然而《墨经》在折射性方面未有涉及。可能的原因在于光折射现象在日常生活中的呈现多与和玻璃相关的载体，如盛水的器皿或充水的球体等有关。玻璃的使用虽可追溯至公元前4500年，但多在埃及、希腊等地使用，传至中国则是公元3世纪之事，距墨子时代已是七八百年之后了。因此墨子时代虽可借青铜镜等研究光的反射现象，但因鲜有透明容器可用，使得光的折射现象未能被认知。

光的折射现象可说是大大造福于人类社会，在这方面人类受益最大的莫过于因光的折射而产生的放大作用。读者可自己做些小实验，例如透过小玻璃球或盛水的玻璃杯来观看小物体如字体等，可以发现小物体被放大了。

人类对于光折射而产生放大作用的初级认知可推至公元前1500年。那时的古埃及人就已经对放大现象有了些感性认识。但是在当时的古文明社会，无论是古埃及人、古希

腊人，还是中国人都未能对折射放大现象有进一步的认识。现存最著名的古代透镜称为“兰亚德透镜”(Lanyard lens)，它是由一个叫兰亚德（Lanyard）的人在一个叫尼姆罗(Nimrod)的地方发掘出来的，经鉴定，它大约于公元前721至公元前705年制成。这是一个石制的凸透镜，石材里面有美丽花纹。在很长一段时间里，兰亚德透镜被认为是已发现的世上第一例平凸透镜(一面是平面，另一面为凸面)。但后来的研究表明，兰亚德透镜的凸面是由许许多多的小平面组合而成的，并不具备放大镜所需的光滑凸面。另外石材里的天生花纹也使透镜的放大功能不佳。因此现在一般认为该透镜原本仅是从某物品上脱落下来的装饰品，而并非是用来作放大镜用的。

关于光的折射现象的记载最早可见于公元前2世纪，希腊数学家托勒密(Claudius Ptolemy)曾描述将一根直棍的一部分插入水中，棍体在水面内及水面外的部分看起来像是相互弯折了一个角度。他并由此正确地估算了水的折射系数(关于折射系数的概念，在第2章会介绍)。托勒密虽未进而揭示出光的折射定律，但却在历史上首开对光折射现象的系统研究。又过了约200年，公元1世纪罗马哲人、西班牙人塞尼卡(Lucius Annaeus Seneca，前4—公元65，古罗马末代皇帝的宫廷教师)描述了装满水的球体所具有的放大作用。他发现透过水球可将小字母放大到清晰可读的程度。其实光通过水球而折射成像与人眼视物的原理密切相关。在公元11世纪左右，阿拉伯学者哈桑撰写了一部重要的光学著作Opticae Thesaurus，研究了眼睛的解剖学构造，说明了眼球是怎样将所见物体成像于视网膜上的。在同一书中哈桑还讨论了包括光的反射定理在内的光学原理，并且意识

需要全本请访问 www.ertongbook.com