

真空隧道——显微新技术¹⁾

C. F. Quate²⁾

扫描隧道(电子)显微镜 (STM) 利用极锐的针尖探查表面电子波函数, 可以分辨出表面上分立的原子, 揭开了表面上台阶、平台和原子列阵的一个新世界。

我是在 1982 年 4 月, 飞临大西洋上空时, 看到真空隧道显微术的报道的。当时我们完成了声学显微术方面的工作, 几个月来正在为斯坦福显微术研究组寻找新方向而烦恼。我正在考虑的方案不少, 诸如建造 X 射线显微镜等, 但没有一件事可以定下来。我本想利用这次飞往伦敦参加会议旅途中的时间, 摆脱掉烦恼, 认真思考思考。在去机场的路上, 我在我的办公室前停了一下, 带上最新一期的 *Physics Today*, 当我打开它的时候正值飞临冰岛上空, 我发现了一段报道, 在 1982 年 4 月 *Physics Today*^[1] 的第 21 页上, 报道了在苏黎世研制的一种新的扫描电镜。在伦敦, 我改变了我的旅行计划, 改道去苏黎世。结果, 此行成为我们组的一场奇遇的开始, 这场奇遇至今仍处在高昂的激情之中。

在苏黎世我看到的是一台显微镜, 它很简单, 然而能够清晰地分辨晶体表面上单原子台阶。这个技术是很精致的。人们把一个极锐的尖针放在离样品表面非常近的位置上, 使针尖的电子波函数与样品表面中的电子波函数相交叠。在探针和表面之间加上一个小的偏压后, 电子通过隧道越过真空。因为电子波函数随距离呈指数地衰减, 隧道电流对于针尖与表面间的距离非常敏感。当探针在样品上扫描的时候, 表面上小到原子尺度的特征就显现成为隧道电流的变化。

我第一次访问苏黎世的详情至今仍生动地留在我的记忆中。当时我对真空隧道显微镜一无所知, 但是我深信一旦我见到它, 我就会对这种真空隧道仪器作出判断。我会见了在真空隧

道组工作的三个成员: H. Rohrer, 他具有在适当的时间选择新的研究领域的才干; G. Binnig, 他决定在难以捉摸的原子范畴进行探索; C. Gerber, 他很幽默, 并具有使工作运转起来的能力。我被允许翻阅由于夹着许多图表记录而鼓胀着的厚厚的记录本。我捕捉到了新世界的闪光——一个原子台阶、台面和原子列阵的新世界。

从 STM 获得的数据是精确的、与众不同的。我在访问苏黎世的笔记中写有: “分辨率是 0.4nm (令人惊奇!)”。横向分辨率从那以后已达到 0.1nm, 它可以检测原子周期列阵的很小的位移。高度的起伏的精确度优于 0.001nm。这个精度是迄今从未达到的, 它给理论家们以新的刺激, 促使他们又从事表面结构的研究。IBM, AT & T Bell 实验室, Xerox, 马德里的 Autonoma 大学和罗马的 Sapienza 大学的理论家们的工作^[2] 对于我们理解这些显微象是必不可少的。

我在访问苏黎世的最初几分钟内所见到的情况, 就决定了我们斯坦福研究组未来的研究计划。我回来后, 向我的研究生描述了图表记录的曲线, 并说服其中的一位研究生, S. Elrod 调整了他的课程。他仅有一些我从苏黎世带回的草图, 但是就是依据这些草图他就建立了 STM。他从这里初步写出了他在这方面的第一篇论文。

1. 四代 STM

我在苏黎世看到的显微镜已是第二代

- 1) 限于篇幅和印刷条件, 原文中的图及少量内容已被删节。我刊已在 1985 年第 4 期发表了戴道宜的“扫描隧道显微镜”文章, 有兴趣的读者可以参阅——编者注。
- 2) 美国斯坦福大学应用物理及电子工程系教授, Xerox Palo Alto 研究中心研究员。

STM 了。第一代 STM 建成于 1981 年，它具有复杂的结构，用一个超导金属碗使全部系统在磁场中悬浮起来。第二代 STM 是用涡旋电流阻尼代替了磁悬浮防震，与第一代相比，第二代在设计上的简化是令人信服的。第二代 STM 建立了一种好的模式，提供了好的设计和稳固的结构，为许多后来人所仿造。在第三代 STM 中^[2]，复杂性又有所回头，目前它也已消失了，代替它的是第四代 STM。第四代 STM 是这样小而有效，以致它获得了口袋式显微镜 (pocket microscope) 的美称。

2. STM 的诞生

STM 开始于 1978 年 Rohrer 与 Binnig 之间在法兰克福的一次谈话。Binnig 那时是法兰克福的 Wolfgang Goethe 大学的研究生。Rohrer 介绍了苏黎世 IBM 公司的表面科学研究计划。在讨论中 Binnig 建议利用真空隧道效应作为开展新工作的适当工具。这一年 11 月，Binnig 到达苏黎世后，立即着手探查有关真空隧道的新思想：探针应该象个什么样子？它怎样扫描表面？

Binnig 想用一根细的探针如金属须 (whisker) 扫描表面，但是热振动困扰着他。他很快弄明白了热引起的运动依赖于探针的纵横比 (aspect ratio)。金属须长而且窄，这种运动将是不可容忍的。短而粗的探针的振动可以忽略，但是这种探针怎么能弄清楚表面的细节呢？

1979 年 1 月 5 日，Binnig 的笔记中如下的一段话提供了解答：针尖的球形表面与样品的平表面之间的隧道电流呈指数衰减，足以把电流的孔径限制在 4.5nm 之内。这一点无疑地成为全部后续工作的决定性一步。

在短短的两年中，Binnig 和 Rohrer 制成了第一台仪器。1981 年 3 月 18 日凌晨两点钟，X-Y 记录仪上的曲线清楚地显示出电子正在“隧道”地穿过真空势垒。几周后，Binnig 和 Rohrer 观察到了明锐的重复的台阶，这些台阶复制出 Au 样品上从一个台面到另一个台面之间的原子台阶。

引起人们重视的不是隧道电流本身，而是

这些明锐的重复的台阶。当时 Binnig 和 Rohrer 很容易失误并失掉这些台阶。因为它们很难被记录下来。在第一台仪器中，探针位置的控制调节不是很精密的，当他们试图把电极更加接近样品表面时，往往会触到表面并损坏表面。Binnig 一小时一小时地控制和调节着，当连续调节到第十二小时时，突然地由于一个不十分清楚的原因，在记录仪的曲线上出现了与原子尺度相对应的台阶。Binnig 和他的小组不仅第一次记录下明锐的原子台阶，而且也看到了在横向台面上的模糊的原子尺度的隆起部 (bumps)。过了不少时间他们才理解所发生的事实，这是因为局部的热膨胀引起了各部件之间的相对运动，把针尖从被损伤的区域移到了 Au 表面上未被触到的平滑的区域。在粗钝的针尖面上的小的凸起 (protuberance) 实际上是一个曲率半径更小的微针尖。

要分辨出单个原子，正象他们当时实际上已作出的那样，需要 0.2nm 的分辨率。分辨率 4.5nm 与 0.2nm 之间的差距是巨大的。这 0.2 nm 的分辨率归因于他们的针尖上的小的凸起。

STM 的重要性，或者说使之区别于其他仪器的特点就是它可以分辨单个原子近邻的细节。如果分辨率还被限制在 4.5nm，那么 STM 只不过是表面研究多增加了一种扫描探针而已。它也就不会激起至今仍在环绕着它的那种激情。

减少隧道电流的截面积并使分辨率改善的凸起可以自然地出现在某些金属表面上。在钨针上面的那些凸起，加上电极与样品间的距离增加时，隧道电流指数地衰减，这两个因素合起来使针尖的有效直径小于 1nm。这些自然的针尖常常是短寿命的，但是它们为我们工作得很好。与此同时，其他更精心设计的技术正在发展。

3. 原有的技术

很值得回顾 1981 年以前的一些研究，这些研究发明了被应用于 STM 中的那些科学和技术，但是这些研究在通向 STM 的路上却止步了。直到苏黎世组作出了他们的实验，分辨

原子的可能性一直没有被意识到。为了达到这一点他们不得不解决许多关键问题——这些问题早已被世界上其他实验室的同行们各自独立地解决了。例如，他们不得不设计一个系统来控制振动，然而这点在 1972 年已经做到了^[4]。他们不得不把真空隧道与扫描组合起来，然而其他人已经使用了扫描。在七十年代末，C. Teague^[5] 在美国国家标准局用尖针轮廓仪记录表面的三维成象时已使用了横向分辨率为 100 nm 扫描。美国国家标准局的 R. D. Young 也使用了扫描，在他的“topografiner”器件中，用场发射电子扫描表面并产生横向分辨率为 400 nm 的象。Young 在 1971 年 11 月“Physics Today”第 21 页上发表的文章中讨论了真空隧道，但是他没有继续追踪这个课题。Teague^[6] 在他的博士论文中恰当地显示了真空隧道，可惜没有发表，没有引起人们的注意。

苏黎世小组知道可以看到单个原子。这点在若干年之前已由场离子显微镜做到了^[7]。他们当时还不知道他们应该去发现的是用这种技术很容易制作超细针尖。原子分辨率的惊人的第一个暗示是隧道电流被限制在一个比钨针投影面积远小的区域中。令人吃惊的是，其他人也已经有了这个认识。例如 C. Spindt 在 SRI 国际公司在他进行的有关 Mo 锥体的场发射研究中得出结论^[8]：“锥体尖端的发射……起因于位于尖端上的一个或几个原子”。但是他没有为了成象的目的去发展这个想法。

4. 场离子显微镜 (FIM)

FIM 是达到原子分辨率的第一种仪器，是一种非扫描式器件。我们可以从下面三个方面来说明这两种仪器之间的密切关系，即单原子象、针尖制备和 Jason 效应^[9]。FIM 已经很长时间被用来使沉积在钨针尖原子平面上的单原子成象。为了 FIM 的需要，针尖制备技术已有高度发展，并被称为场致蒸发^[10]。在这个过程中，钨针被加热至这样的温度，使得原子表面层的行为类似于液体。此时表面张力使表面光滑并且钝化了针尖的端部。为了克服这个平滑化的趋势，人们可加上一个强电场，于是原子从

表面一层一层的蒸发掉，针尖变得很尖锐。苏黎世 IBM 公司的 Hans-Werner Fink 自信使用这种技术可以建造出在顶端具有单个原子的稳定的针尖。

在 FIM 和 STM 这两种仪器之间的更有趣的关联是 Jason 效应。六十年代末，A. J. Jason 在芝加哥用 FIM 作他的学位论文时，测量到了离开针尖附近区域的电离原子的能量分布呈周期性的变化。在 FIM 中，中性气态原子接近针尖时遇到高电场并被离子化。在这个过程中被释放出的电子从电离原子向针尖移动，并且部分地在表面被反射。结果，在针尖表面和电离原子之间的势阱中形成电子驻波。这个驻波引起了被 Jason 测量到的周期性变化。

相似的周期性变化也出现在热离子阴极发射的电子能量分布中，这一点在四十年前 C. Herring 的经典文章^[11]中已描述过了。

相似的情况也出现在 STM 中。当人们增加针尖与样品之间的距离时，如果距离足够大，电子驻波将在针尖与样品表面之间出现。当针尖上的电压增加时，电荷密度驻波引起隧道电流的小的周期性变化。看来一旦在靠近导体表面的真空中有自由电子存在，这些波就出现。Herring 提议这个效应可用来研究吸附层。我的直觉告诉我 STM 将被证明是实现这一设想的简单系统。

5. 迅速发展中的技术

在 STM 的早期，大部分结果来自苏黎世。其他实验室也正在开发这项技术，它们成象的质量参差不齐。这个状况的改变是迅速的。大约两年前，在 1984 年 12 月墨西哥 Cancun 会议上，AT & T Bell 实验室的 J. Golovchenko 还曾发问：“这是科学吗？我们的结果可以重复吗？”到了 1985 年 7 月在奥地利 Alps Oberlech 真空隧道会议，问题就已得到很肯定的回答。这次会议上几乎每天都有新的意外结果的报道。这些报道的范围从“口袋式显微镜”到用真空隧道获得的表面原子结构细节。在纽约 Yorktown Heights IBM 的 J. Demuth 和 Golovchenko 都提供了极好的硅表面照片。在会

议临近结束时，我们都已知道 STM 已经是一项可以应用的有效的新技术。正如 Rohrer 向我说的那样：“现在好了，看来每个人全都掌握了。”的确，Brinkman 报告认为^[12]，1985 年 STM 的进展是 14 年前 Bromley 报告发表以来在实验科学中最激动人心的进展之一。

这个领域在迅速地取得进展。Binnig 在 Oberlech 会议上的报告是这样开始的：“最初我们并不意识到它是一个显微镜”。当时他回顾的仅仅是五年前的情形。

6. 原子力显微镜

隧道显微镜，从它需要电流这一点来看，只能用于研究导电表面。人们不能用它探查绝缘体。Binnig 最近介绍^[13]的一种复合器件，解脱了上述限制。他称它为原子力显微镜。这个显微镜以一个安装在小支架梁上的针尖为特征。样品接近针尖后象在 STM 中那样靠压电元件扫描。针尖和样品间的原子作用力使支架偏转，监测这个偏转可确定作用在针尖上的力。在新器件的首次演示中，当样品被扫描时，STM 被用来检测支架的偏转。从 STM 得来的信息也可用来显示成象，分辨率大约是 30 \AA 。这点将很快会得到改善。有几个研究组正在这种新仪器上工作着。

7. 研究成果

下面我们介绍有关研究工作者得到的和 STM 有关的一些成果。我们从石墨开始，石墨是由碳原子平面构成的惰性的层状结构，其平面间距为 0.342 nm ，靠范德瓦耳斯力连接在一起，在层内的原子间距为 0.142 nm ，靠强的碳链连结在一起。石墨是 STM 的理想衬底，因为它的原子平面可以达到 100 nm 尺度而没有台阶。在象石墨那样平坦的材料上可以很快地移动电极。在斯坦福，我们已经证实扫描速度可以增加至可能实现“实时”成象的程度。可以把象直接地记录在录相带上。几个研究组的工作已经表明，可以在空气中大气压下使材料成象，不再需要超高真空条件了。P. Hansma 和他的加州大学 Santa Barbara 分校的学生们已经证明把样品完全浸泡在水中，STM 也可以使石

墨中的碳原子成象。他们计划使水溶液中的生物分子成象，这时 STM 的上述功能将显得更为重要。

STM 在空气中得到的石墨基面象的突出特点是有山峰和空穴，它们形成了带心的六角列阵。在最上面两层中，有些原子恰好在下面的另一个原子之上。另外一些最上层原子的下面没有原子，山峰就出现在后一情况，即出现在电子波函数从表面向远处延伸的那些地方。空穴则出现在另一些地方，即出现在上面没有原子的第二层中的原子处，这些地方的电荷密度降到表面以下大约 0.1 nm 处。在这些象中，电子波函数空间分布形成的图象不一定必然就是原子位置的分布图。经常的情况是最高电荷密度区域与原子核的位置一致。但是也有一些重要情况并不如此。在我们讨论了硅的成象后，将再回到这个问题上来。

8. Si

Si 是技术上极重要的材料，它的表面将会继续受到极大的注意。Si(111) 表面的结构比石墨更复杂。当样品加热至 900°C 以上时，表面原子变得可以迁移了。表面二维点阵重新排列，以减少悬挂键的数目，使总能量极小。这个表面叫做再构表面。Si(111) 表面的再构是在大约 25 年前在 Bell 实验室首次被观察到的，当时 J. Lander 在他的低能电子衍射图中发现了 49 个额外的斑点 (S. Y. Tong 在 1984 年 8 月“Physics Today”第 50 页上讨论了这个问题。)表面原子重排后的 7×7 再构形成新的表面原胞，它的两个基矢都是体材料中基矢的七倍。然而，原子在重构后的空间排列的细节仍困扰着 Lander。1983 年初，Binnig 首次发表再构表面的 STM 象^[14]。许多人立刻就认识到这个象可以提供细节。当这个象公布在出版物上的时候，在美国和欧洲各处真空隧道的研究已有了迅猛的增长。

单晶的清洁表面由台面和台阶组成。现已查明台阶在表面上发生的各种反应中扮演着重要角色。STM 象有助于我们对这些反应的识别。已观察到 7×7 再构 Si(111) 表面上有

台阶。这个象表明再构延伸到台阶的边棱。乍一看来这似乎是惊人的。但是我们应该明白，它应该这样，因为再构过程实际上是从台阶处开始的。AT&T Bell 实验室的 Russell Becker 和 Golovchenko 第一次向人们显示出 STM 可以用无先例的清晰度记录这些台阶。用别的技术来获得这种原子位置的信息看来是有疑问的。

9. 表面态

除了地形图以外，STM 已用来研究金属、半导体的表面态。表面态是电子波函数限制于表面层中的态。在密芝根州的 Dearborn 的 Fort 研究实验室，W. Kaiser 和 R. Jaklevic 研究贵金属铂和金时，给出了这领域中最早的工作。先选用这些材料是因为它们的表面态已由传统方法很好地研究过了。从 STM 得到的 $I-V$ 曲线，即隧道电流和针尖电压的函数关系，人们可以确定这些态的能量。在 $I-V$ 曲线导数中峰的位置可确定出高态密度所在的能量位置。通过表面成象，人们也可以记录特殊表面态的空间分布。这时要设置一个电压，使之对于要观察的态有最大的响应。在 Yorktown Heights 的 IBM 实验室，R. Feenstra 用这种方法已经记录了体能带带隙中的表面态在空间的扩展。Feenstra 有一台解离晶体的设备，使他能够用 STM 研究新鲜表面，得到的有些象是十分清晰的。在解离的 Si(111) 表面上，有两个表面态能带，其间隔为 0.45eV，能量低的那个能带接近体 Si 价带，这个能带是满带，能量较高的那个表面能带接近体 Si 带隙的中点，是未占据的空带。当样品加正偏压时，电流从针尖通过隧道进入能量高的空带上。当极性反向时，电子从满带态通过隧道流向针尖。对应这些表面态的电子波函数是驻波。上能带中电子形成的驻波的节点，恰与低能带中电子形成的驻波节点反位相。电子驻波由进行扫描的针尖探测，驻波极大的地方对应明亮的象点。因此，我们能预期当偏压反向时能看到相反的反差。在正偏压时象中的明区（电子通过隧道进入能量高的表面态）在负偏压时将变成暗区（电

子从低能量表面态通过隧道出来）。这说明我们正在测量表面电荷密度，而不是原子位置的地形图，因为原子核固定在那些点阵位置上。

层状结构中表面态的引人注目的例子出自法国马赛 Aix-Marseilles II 大学的 F. Solvan 及他的 IBM 苏黎世实验室的同事们。他们对覆盖一层 Au 的 Si 表面的电子性质有兴趣。他们先使清洁的 Si 表面再构为 7×7 图形，然后沉积单层的 Au 到这个再构表面上。他们改变间隙电压并监测电导率，观察到在近 1eV 处的一个强峰。他们把这个峰归因于一个新的表面态，因为它未在清洁 Si 表面测量中出现。加上 1V 偏压后，很容易记录这个态在空间的变化。

10. Ni

Binnig 小组使用 STM 研究了金属衬底上的薄膜，即 Ni(100) 表面上的氧化镍。他们先校准这个系统，测量清洁 Ni 表面的电导率作为电压的函数，并且未发现任何反常。当他们把针尖移到覆盖有几个原子层的氧化镍区域时，他们观测到当把电压控制在 1V 时， z 方向收缩 0.3nm 才能保持电流不变。这个距离变化标志着电导率的变化。因为隧道电流在距离增加 0.1nm 时，约减少一个数量级。0.3nm 的改变指明电导率有极大的增加，它好象不是由氧化镍中的表面态引起的效应，它象是某种与能量有关的穿透氧化薄层的导电。对氧化镍行为的理论解释有过一段有趣的有争论的历史。N. Mott 在他的文章^[13]中说：“预言它具有金属行为，但是事实上这个材料是透明的绝缘体”。从 STM 中发现的这个新的高电导率与从某些光电研究中得到的结果不一致，它不但没有把问题澄清反倒有些使争论加剧了。

11. 从催化剂到病毒

Munich 大学的 J. Behm 和 W. Hösler 的工作表明，隧道电流在不同条件中作为表面探针是很有用的。他们使用 STM 研究暴露于热了烯蒸气中的铂表面的变化。他们选择铂表面的一个有很多台阶的区域。他们观察到在开始暴露于蒸气中时，碳原子在台阶附近沉积，继续

暴露于蒸气中,碳原子扩展远离台阶,直到它们完全覆盖了台面。这种细节在对催化反应的理解中是重要的,这表明 STM 可以扮演关键角色。

上述这些例子表明了这个新技术的能力,但是还不足以说明它的全部价值。R. Coleman 和 Hansma^[46] 在 Virginia 大学用 STM 去观测在 77K 温度下 TaS₂ 中的电荷密度波。在斯坦福, STM 已用来研究在 6K 温度下 Nb₃Sn 的超导能隙的空间变化。在较大尺度范围的工作中, N. Garcia 使用 STM 研究病毒的形状及它们表面上的粗糙度。

STM 能提供表面电子结构成象以外的其他东西吗? 或许可以。当我们在评述扫描电子显微镜的历史^[47]时, 我们知道它从一个成象器件演变为在集成电路中刻写细线的系统。我们之中的一些人相信, STM 也将以某种方式演变。我们希望有一天能达到可以用针尖来拨弄单个原子或分子。

在这个方向上已经有有了一个开始。M. Ringer 和 H. Gunderodt 在瑞士的 Basel 大学用 STM 在碳氢化合物膜上刻画图形原象, 分辨率为 16nm。F. Pease 和他的学生 M. McCord 在斯坦福用 W 电极电子发射使保护膜的薄层显影。他们使用小于 10V 的针尖势场, (这个能量几乎是 STM 所能承受的最高能量)。他们的工作向我们提示, 有一天 STM 将被用来写与读分子尺度的图形。

参 考 文 献

[1] G. Binnig, H. Rohrer, *Sci. Am.*, August (1985), 50;

- J. A. Golovchenko, *Science*, 232 (1982), 48.
- [2] D. J. Chadi, *Phys. Rev. B*, 30(1984), 4470; A. Baratoss, *IBM J. Res. Dev.*, to be published; N. Garcia, C. Ocal, F. Flores, *Phys. Rev. Lett.*, 50(1983), 2002; W. A. Harrison, *Surf. Sci.*, 55(1976), 1; N. D. Lang, *Phys. Rev. B*, 55(1985), 23; K. C. Pandey, *Phys. Rev. Lett.*, 47(1981), 1913; A. Selloni, P. Carnevali, E. Tosatti, C. D. Chen, *Phys. Rev. B*, 31(1985), 2602; J. Tersoff, D. R. Hamman, *Phys. Rev. B*, 31(1985), 805.
- [3] G. Binnig, H. Rohrer, *Sci. Am.*, August (1985), 50.
- [4] J. N. Israelachvili, D. Tabor, *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A*, 331(1972), 19.
- [5] E. C. Teague, F. E. Scire, S. M. Backer, S. W. Jensen, *Wear*, 83(1982), 1; P. A. Engei, D. B. Millis, *Wear*, 75(1982), 423.
- [6] E. C. Teague, Room Temperature Gold-Vacuum-Gold Tunneling Experiments, Dissertation, North Texas State Univ. Univ. Microfilms International, Ann Arbor, Mich., (1978), 141.
- [7] J. A. Ranitz, *Methods Exp. Phys.*, 22(1985), 349.
- [8] C. A. Spindt, I. Brodie, L. Humphrey, E. R. Westerborg, *J. Appl. Phys.*, 47(1976), 5248.
- [9] A. J. Jason, *Phys. Rev.*, 156(1967), 266.
- [10] F. Hasselback, M. Ncklaus, *J. Phys. E.*, 17(1984), 782.
- [11] C. Herring, M. H. Nichols, *Rev. Mod. Phys.*, 21 (1949), 185.
- [12] Physics Survey Committee, Physics Through the 1990s. National Academy P., Washington. DC, (1986); for a Review of This Report, see *Physics Today*, April (1986), 22.
- [13] G. Binnig, C. F. Quate, C. Gerber, *Phys. Rev. Lett.*, 56(1986), 930.
- [14] G. Binnig, H. Rohrer, C. Gerber, E. Weibel. *Phys. Rev. Lett.*, 50(1983), 120.
- [15] N. Mott, *Rep. Prog. Phys.*, 47(1984), 909.
- [16] R. V. Coleman. B. Drake, P. K. Hansma, G. Slough. *Phys. Rev. Lett.*, 55(1985), 394.
- [17] O. C. Wells, *Scanning Electron Microscopy*, McGraw-Hill, New York, (1974).

(韩汝珊译自“*Physics Today*”,
1986年8月号, 26—33页)

(上接第152页)

这比周围粘胶区原子寿命 1/2 秒高。限制约束时间的主要因素是真空气度。Bell 小组装置的真空气度为 10^{-9} Torr。这种系统中残余气体原子的碰撞会将原子撞出约束区。最近 Bell 小组进一步改进了系统, 增大了约束区体积, 改善了真空, 已将约束时间提高到几十秒。

但上述光学阱也有缺点, 它只能用于碱金属原子, 或许还可用于氦原子。另外它的反复冷却和注入的过

程使许多效应混合在一起, 造成物理研究上的一些困难。应该说各种阱各有千秋, 也许人们应根据研究对象的不同而选用不同的阱。

参 考 文 献

- [1] B. Schwarzschild, *Phys. Today*, No. 9, (1986), 17.
- [2] S. Chu et al., *Phys. Rev. Lett.*, 57 (1986), 314.

(陈天杰)