

# 原子磁芯片与量子回路

Ed Hinds 撰文 侯春风 译

(哈尔滨工业大学物理系 黑龙江 150001)

在过去几年中,物理学家们研究出了多种可把原子云团冷却到温度低于 1 微开( $\mu\text{K}$ )的技术。处于这些云团中的原子是如此之冷,以至于它们不能再被看作是遵守牛顿定律的经典粒子,而应被看作是由量子力学所描述的可传播、衍射和相互干涉的波。

现在,人们已经可以把冷原子囚禁在横向尺寸只有 100 纳米的量子点内,也可使之在长的狭管中流动,就像电子在很细的导线中流动一样。人们开始注意到一种全新的技术的可能性,这一技术与微电子技术相类似,只是它基于受控冷原子流及原子之间的相互作用。这种被称为“原子芯片”的器件可以利用量子力学原理来完成非同寻常的测量或计算工作。目前,这种芯片还非常简单,由几条喷镀在基底上的载流导线构成。尽管如此,由于原子芯片具有如此巨大的潜能,仍然使人们兴奋不已。

## 微型磁波导

电子是沿着自身的角动量或“自旋”方向磁化的,具有一定的磁矩。但是多数原子却是非磁性的,因为它们的核外电子成对排布,它们的角动量互相抵消了。然而,碱金属原子锂、钠、钾、铷、铯却不是这样,它们具有奇数个不成对的电子,因此它们的行为类似于微小的条形磁铁。当把这类原子置于方向与其磁矩方向相反的磁场中时,由于在磁场强度最低的位置处原子与磁场的相互作用能最低,因此原子将被吸引到磁场强度最低的地方。由此可见,可以利用载流导线或永磁体对原子进行磁陷阱。两年前,本文作者(Ed Hinds)所在的英国索塞克斯大学研究组用实验说明了如何根据这一思想在实验室中制做原子波导。这种波导(见图 1(a))是利用英国南阿普顿光子研究中心特制的玻璃纤维制成的。玻璃纤维中有 5 个孔洞,处于中心的一个用来导引原子,外层 4 个用来容纳铜导线。强度为几安培的电流交替反向通过 4 根导线,电流产生的磁场强度在玻璃纤维中心处为零,而在玻璃纤维外侧越远的地方场强越大(如图 1(b)所示)。如此分布的磁场将对原子施加一个导引力,把弱场寻址原子导引到玻璃纤维中心附近区域。

然而,如果场强太小,原子磁矩将会发生“反转”。在原子波导中这种反转会带来灾难性的后果,因为此时原子将变为强场寻址,因而会被推向玻璃管壁。为避免这种现象,我们沿波导施加一恒定的外磁场,来保证玻璃纤维中心处磁场强度最低且不低于大约 0.1 高斯。

为了用实验演示原子导引,我们把几百万个铷原子聚集在磁光阱中宽度大约为 1 毫米的原子云团中,并把原子温度冷却到了 25 微开( $\mu\text{K}$ )。原子云团被置于玻璃纤维顶部上方 10 毫米处,由于温度很低,原子运动速度只有每秒几厘米。当势阱被关闭时,原子将会几乎竖直地落入玻璃纤维中。为了把原子准确地送入波导,我们在玻璃纤维顶部放置了一个线圈,该线圈可产生一个漏斗形的磁场,能有效地把原子导引到宽度仅 0.5 毫米的波导入口处。

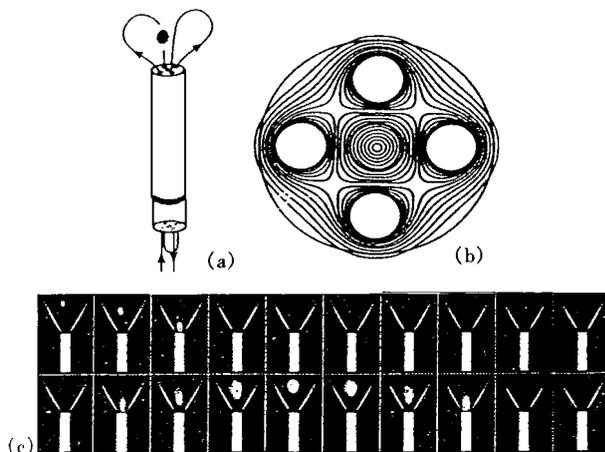


图 1 四导线原子波导

为了观测任意特定时刻原子云团的行为,我们用一束激光照射到原子云团上,并用一部照相机记录散射光。由于每当散射出一个光子,原子都将发生反冲,进而改变原子云团随后的演化,所以实验必须在每次激光闪烁之后重新开始。然而,一旦原子进入波导中,它们就不能再被成像,因为玻璃和导线会散射太多的光,相机无法拍摄到原子云团的行为。为了避免原子从波导底部漏出,我们在波导底部附近安装了一个小线圈,它可使该处磁场强度急剧增加,这一磁场可把原子云团向上反射回波导。这样,

现代物理知识

在被释放 115 毫秒之后,原子云团将重新形成,并沿玻璃纤维向上升起,然后再落下(如图 1(c) 所示)。

通过外加水平方向恒定磁场可使总磁场的中心移动,进而可使波导内的原子云团向外侧偏移。如果偏移得足够远,部分原子云团将碰到玻璃壁上,并由于被加热至室温变成稀薄的背景蒸气而被损耗掉。利用这一技术,我们发现原子云团由波导中心向外延展了 0.1 毫米,这表明此时原子云团的横向振动能是最初横向振动能的 30 倍。多余的能量来源于引力,它是原子下落到漏斗的过程中获得的动能的一部分。这一加热过程明显地表明引力可在冷原子物理范围内产生巨大的能量,还表明用来囚禁原子的磁能远远大于引力能。

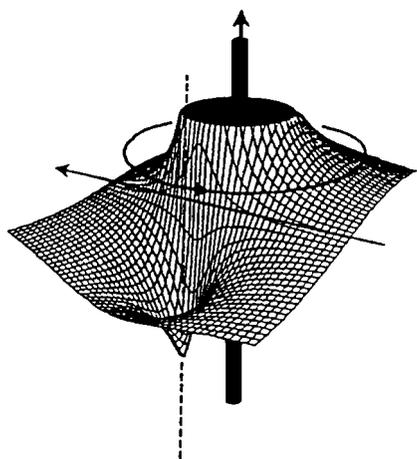


图 2 单导线原子波导

垂直方向施加有恒定磁场的单一载流细导线也可用来制做一个小的波导(如图 2 所示),弱场寻址原子在导线产生的磁场与外加磁场相抵消的区域内被导引。这种单导线波导是由德国图宾根的埃贝哈德-卡尔斯大学的齐默尔曼(Claus Zimmerman)领导的小组和奥地利因斯布鲁克大学的施密德迈尔(Jörg Schmiedmayer)领导的小组于 1998 年研制出的。他们证明原子可被这种势阱陷停在一条长的细线(图 2 中的虚线)上。

### 原子波导的量子力学效应

陷停在原子波导中的原子受到的力与其距波导中心的距离成正比。根据经典力学可知,原子将在波导中点附近以特定频率  $f$  作简谐振动,振动频率由原子所受的力随距离变化的快慢决定。但是当一原子被囚禁在与其德布罗意波长一样小的区域内时,其运动将由量子力学来描述。正如处于箱中的任何粒子一样,量子力学决定原子的运动具有分立

的能级。对于谐波导,原子的能量为  $hf$  的半整数倍,其中  $h$  为普朗克常数。另一方面,原子的温度——原子所具有的能量的标度,决定了其在能级中所处的位置。

在我们的四导线波导中原子的振动频率为 10 千赫(kHz),这意味着温度低于 0.5 微开的原子将被囚禁到波导的基态上。遗憾的是,我们在实验中所用的原子云团的温度比 0.5 微开高很多,原子具有足够的热能去占据大量的能态,因此在实验中没有观测到任何量子效应。

然而,在其他一些冷原子实验中原子被冷却到了超低温,所有原子都布居到最低的能态上,形成所谓的玻色-爱因斯坦凝聚。处于这种状态的原子云团由于没有足够的能量达到激发态,因而将以无任何横向振动的量子基态在波导中传输,这是一个名副其实的量子现象。我们研究组和其他一些研究组的目标是能像控制一维气体一样操控超冷原子通过原子波导。

为了观测原子势阱中的量子效应,我们设计制做了一个具有非常大的磁场梯度的波导。在这一波导中,原子受到的向波导中心的推力是很大的,同时,原子在波导中的能级间距  $hf$  也很大。能级间距  $hf$  很大,表明原子具有很高的振动频率。高的振动频率的好处是原子需要大量的能量才能从波导的基态跃迁到第一激发态,而冷原子却没有足够的能量进行跃迁,因而可保留在基态。虽然我们的四导线波导中导线中的电流强度只有几个安培,但是我们还是成功地产生了每米 10 特斯拉(T/m)的磁场梯度,因为实验所用的玻璃纤维的核心的直径很小,只有 260 微米。

为了进一步提高磁场梯度,我们研究组正用商品化的录像带作为具有小尺度结构的强磁场源。我们已经通过在磁带上记录正弦波并外加恒定磁场的方法,制成了一个极微小的原子波导阵列。此外,我们还发现波长为 50 微米的正弦波磁化模式加上 5 毫特斯拉的外加磁场可在波导中产生每米 600 特斯拉的磁场梯度。这种波导阵列的另一个励磁性能是可通过旋转外加磁场方向的方法用它来移动录像磁带表面的原子——就像是一种运输原子的列车。

### 原子芯片

就像许多好的想法一样,利用微型化器件获得强的磁场梯度的想法独立且几乎同时地出自几个不同研究组。1995 年,当我们最先用录像带产生强磁

场梯度时,美国加州理工学院的力伯莱希特(Ken Libbrecht)和维恩斯坦(Jonathan Weinstein)提出了在量子水平上实现原子囚禁的计划。他们提出在半径为 $r$ 的回路中,强度为 $I$ 的电流所产生的磁场梯度正比于 $I/r^2$ ,当 $r$ 很小时,磁场的梯度将会很大。在他们的实验中,回路中电流产生的磁场可被另一个大一些的线圈产生的外加磁场抵消掉,进而可产生一个可用来陷俘原子的周围为强磁场梯度的零磁场区域。力伯莱希特和维恩斯坦提出可利用附着在平面基底上的微细超导电路在小尺度空间内获得适当的电流强度。

许多研究组开始在蓝宝石、陶瓷或半导体材料基底上制备微细的导线,并探讨如何使这些导线既可以通过大电流又不致被损坏。美国哈佛大学的普润提斯(Mara Prentiss)及其合作者发现20微米宽20微米厚的金导线在室温下可以承载强度为几安培的电流,这一发现表明,要在小尺度空间内获得适当的电流并非必须采用超导材料。这些金导线是通过先利用标准的光刻法在金薄膜上刻制出导线雏形,然后再把更多的金电镀到导线上以把导线的厚度增加到大约100微米,进而制成微结构导线。

1999年,隶属于澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)和墨尔本大学的汉纳福德(Peter Harnford)研究组观测到冷铯原子云团可在由上述薄膜技术加工成的一系列微细导线所产生的磁场中上下跳动。随后不久,美国科罗拉多大学的天体物理联合研究所(JILA)的安德森(Dana Anderson)和康奈尔(Eric Comell)及其合作者率先在芯片上制成了第一个原子波导。

JILA研究所研制的原子波导是由电镀在玻璃基底上的两根横截面积为100平方微米相距100微米的导线构成的。当相同强度的电流通过这两根导线时,位于基底上方50微米且处于两根导线中间的直线上的磁场强度将为零,两根导线产生的磁场梯度将在这条线上导引弱场寻址原子。实验中,安德林、康奈尔及其合作者在一个与芯片分开的磁光阱中收集原子,然后以每秒10米的速度把它们沿着波导直接射入芯片。

波导中的磁场梯度足以捕获一些原子,这些原子在被送到探测器之前将绕着阻挡物运动。当切断导线中的电流,原子将撞击到阻挡物上,因而不能再被探测到。这一实验证明了在芯片上导引原子的可行性,但也暴露出了一个关键的技术难点:需要预先

对原子进行处理,以使它们在波导结构中缓慢地流动,而不是把它们以高速从外部灌输进去。

为解决这个难题,德国慕尼黑路德维希·马克西米利安(Ludwig Maximilians)大学的汉斯(Theodore Hänsch)及其合作者发明了一种被称为“镜磁光阱”的改进型磁光阱。这种装置在芯片表面上方收集并冷却原子,靠芯片表面来反射用以冷却原子云团的激光束。镜磁光阱的磁场先由一对较大的载流线圈产生,一旦冷原子被聚集起来,较大的磁光阱线圈中的电流就将被切断,它们所产生的磁场将被芯片上电流产生的磁场所代替,从而使原子平稳准确地进入芯片的磁波导结构中。

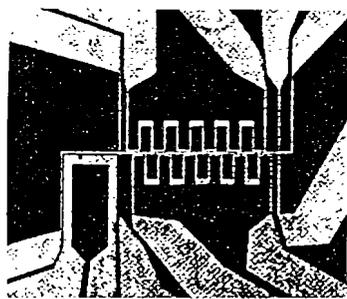


图3 原子芯片

慕尼黑科研人员研制的原子芯片由一个大的U形环路和细导线形成的波导组成(见图3)。U形环路的作用是把原子从镜磁光阱输送到芯片表面,使原子从那里进入势阱。主干波导是通过对外枢导线激发的磁场施加偏磁场而产生的。与外枢导线正交的外加“箍缩导线”产生一个沿主干波导方向的可以把原子推向波导末端的磁场,这与在索塞克斯大学进行的实验中的箍缩线圈的作用很相像。另外还有两根布置成方波形的导线,它们的作用是用来沿主干波导输送原子。

汉斯及其合作者利用相位差为 $90^\circ$ 的交流电可以把波导中的原子向左或向右推移,推移的方向取决于哪根导线中的电流具有超前的相位。这种微型助推器相当于早些时候人们所描述的原子搬运机,只是它采用的是微结构导线而不是微结构磁场。通过利用助推器操纵原子,慕尼黑研究组完成了芯片主干波导中的原子碰撞实验。虽然芯片中原子的热能再一次大到足以激发出大量横向振动量子态,但是这些原子有很大的机会被冷却到更低的温度。

一个最引人入胜的想法是先在芯片上的一个小势阱中捕获几千万个原子,然后再通过蒸发冷却的方法使之冷却。势阱的温度随着较热的原子逐渐蒸

发而降低,直到最终达到几百纳开。如果这些原子是玻色子,即如果它们的自旋是  $\hbar$  ( $\hbar = h/2\pi$ ) 的整数倍,则它们将聚集在势阱的最低量子态上。

最早的玻色-爱因斯坦凝聚体是在1995年产生的,现在可利用蒸发冷却方法把它们按例程序不太费力地制备出来。迄今,人们还没有能够在微型波导和势阱中产生玻色-爱因斯坦凝聚体。但是,有几个研究组已经接近实现这一最终目标。当一个玻色-爱因斯坦凝聚体被发送到芯片上的一个原子波导中时,人们希望它能非常像单模光纤中的光场或传输线中的微波场一样,以确定的横向分布在波导中传输。

### 原子量子回路

原子芯片和蒸发冷却的发展使我们接近了制造量子回路这一梦想,在量子回路中,冷原子在装置中的波导和势阱中流动并且发生相互作用。作为一个简单的量子回路的例子,我们来设想一个把一束原子分裂成两束然后再把它们合并起来的波导,原子的基态波函数在波导劈裂处分裂成两部分,接下来当两部分重新合并时,原子云团的末态依赖于两条路径上德布罗意波叠加起来的相位差。如果没有相位差,原子束将合并为基态,可是当相位差为  $\pi$  时,两束原子将合并成第一激发态。

举例来说,如果原子干涉仪的一个臂比另一个臂高,则两个臂中的原子的德布罗意波就将由于两个臂上的引力场存在微小差异而产生相位差。我们研究组最近的研究表明,芯片上的原子干涉仪对引力场和转动具有惊人的敏感性,有望成为从石油、矿产勘探到导航等领域中的一个强有力的应用工具。

填充有玻色-爱因斯坦凝聚体的量子回路可以使量子力学中的一些最深奥的思想在今后的器件中发挥作用。我们希望在量子回路中玻色-爱因斯坦凝聚体的行为能像宏观流体一样,并且像超导体中的电流一样无摩擦地流动。这就意味着所有超导效应,例如约瑟夫森节和超导量子干涉器件等,都可利用玻色-爱因斯坦凝聚体相类似地实现。在芯片中制备玻色-爱因斯坦凝聚体有可能为我们理解量子流体提供全新的机遇,并且开辟全新的研究天地。

原子量子回路的最终目标大概就是实现梦想中的量子计算机了。原则上,量子计算机可完成某些普通计算机所不能完成的工作。量子计算机的基本思想是,在原子芯片上流动的每一个原子都可以存储一个量子“位”或“量子位”,一个量子位可以同时

提供逻辑值0和1。如果有  $n$  个原子形成一系列量子位,则它们联合在一起可同时存储从1到  $2^n$  之间的任何或所有数字。这种复杂的多粒子量子态,即所谓的“纠缠态”是量子计算的核心,它们赋予量子计算机同时进行大量不同的计算工作的能力。

量子计算机的基本运算过程是受控“非”运算(NOT运算),这一过程同时作用于两个位,即控制位与目标位。如果控制位处于“1”态,目标位状态将发生反转;而当控制位处于“0”态时,则目标位状态保持不变。去年,奥地利因斯布鲁克的周勒(Peter Zoller)及其合作者与英国索塞克斯研究组合作说明了如何利用被精确控制在原子芯片内的中性原子对进行受控“非”运算。

虽然目前人们还远未研究清楚如何详细地设计量子计算机,但是我们现在已经能够制备温度为纳开的冷原子,并且可把它们囚禁在纳米尺度内,这些工作足以为上述量子控制提供实实在在的可能性。

### 前景展望

虽然原子芯片正处于初级阶段,其基本技术尚在发展,但其可行性还是非常吸引人的。我们现在可以梦想研制一种既包含微尺度原子势阱和微结构波导又包含微电子电路的原子芯片,利用这种芯片把原子操纵器件与微电子电路完全集成起来控制并探测原子。

另一个引人入胜的有可能实现的想法是在芯片中制造微型光学谐振腔,进而像控制原子一样用量子手段对单光子进行操纵。实际上,微型光学谐振腔与原子芯片结合起来,将有可能导致一场类似于我们大家都已亲眼目睹的由电子学与光学相结合而在近20年间发生的革命。

美国加州理工学院的开姆堡(Jeff Kimble)及其合作者与德国马克斯·普朗克量子光学研究所的莱姆佩(Gerhard Rempe)研究组通过让原子在重力作用下落入优质光学微腔的方法,实现了单光子对单原子的囚禁。但是,迄今人们还无法使原子可控地进入微腔。借助于微尺度冷原子势阱和微结构波导与微型光学元件及微电子学的结合,原子芯片正把我们引入一场新的技术革命。

如今,物理学家们已初步学会了如何控制原子的外自由度,可以获得以前从未用过的全新的控制技术——量子控制技术。此外,原子和光子的受控微操纵技术还有望带来具有全新功能的新工具。

(译自2001年第7期 Physics World)