

分子光学及其应用前景*

印建平[†]

(华东师范大学物理系 光谱学与波谱学教育部重点实验室 上海 200062)

摘要 随着原子光学的快速发展,一门新兴的有关研究中性分子与电场、磁场和光场等物质相互作用及其冷却、囚禁、操控与应用的学科——“分子光学”正在逐步形成.文章首先就分子光学的学术内涵及其研究内容作一简单类比与讨论,其次就冷分子束的产生与超冷分子样品的实验制备、超冷分子物理与光谱学、非线性与量子分子光学的研究及其最新进展进行简要综述.最后就分子光学的应用前景进行了展望.

关键词 分子光学,冷分子束,超冷分子样品,超冷分子物理,超冷分子光谱学,非线性分子光学,量子分子光学

Molecule optics and its application prospects

YIN Jian-Ping[†]

(Key Laboratory for Optical and Magnetic Resonance Spectroscopy, Department of Physics, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract With the fast development of atom optics, a new subject has been created molecule optics, that studies the interaction of neutral molecules with electric, magnetic and light fields, as well as the cooling, trapping, manipulation and control of molecules. In this review the definition of molecule optics and its field of study are first presented. Secondly, the generation of cold molecular beams, the experimental preparation of ultracold molecular samples, ultracold molecular physics and spectroscopy, and nonlinear and quantum molecule optics are reviewed in some detail. Finally, the outlook on certain prospective applications of molecule optics is briefly summarized.

Key words molecule optics, cold molecular beam, ultracold molecules, ultracold molecular physics, ultracold molecular spectroscopy, non-linear molecule optics, quantum molecule optics

1 引言

自20世纪90年代初以来,中性原子激光冷却与囚禁的理论、实验及其技术得到了快速发展,并取得了巨大的成功和辉煌的成就,特别是原子气体中的玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)、微阱BEC、原子芯片、原子激光(包括原子孤子激光)、光速减慢、原子物质波中的四波混频和原子孤子、超流中的Vortex等一系列实验的成功,导致了一门全新的“原子光学”学科的诞生与发展^[1-2].有关“中性原子的激光冷却、囚禁与操控”可参阅有关综述文章^[3-5].

众所周知,当激光冷却与囚禁技术应用于离子与中性原子时,在12年内已经三次获得了诺贝尔物理学奖.其中因激光冷却与囚禁技术成功应用于离子及其原子钟,Ramsey N F, Paul W 和 Dehmelt H G 三位科学家获得了1989年度诺贝尔物理学奖.随后,因激光冷却与囚禁技术成功应用于中性原子,突破多普勒冷却极限和亚反冲冷却极限,并获得约为3 nK的超冷原子样品,Chu S, Cohen-Tannoudji C

* 国家自然科学基金(批准号:10174050)资助项目;上海市重点学科与教育部211专项基金资助项目

2002-11-01收到初稿,2002-12-20修回

[†] E-mail: jpyin@phy.ecnu.edu.cn

和 Phillips W D 获得了 1997 年度诺贝尔物理学奖。最近,因激光冷却与囚禁技术成功地应用于原子气体中玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)的实现及其“非线性原子光学”与“量子原子光学”研究的开创,Cornell E A, Ketterle W 和 Wieman C E 获得了 2001 年度诺贝尔物理学奖。因此,人们不禁要问:利用激光冷却与囚禁技术会不会产生第四个、第五个……诺贝尔物理学奖?国际上一些物理学家大胆预言:中性分子的冷却、囚禁与操控有可能成为下一个获得诺贝尔物理学奖的前沿研究领域之一。此外,超冷分子可用于基本物理问题的研究、基本物理常数的精密测量、分子波包动力学的相干操控、分子冷碰撞性质的实验研究、光学频标精度的改善、超冷分子钟、无多普勒展宽(超高分辨率)分子光谱学、非线性超冷分子光谱学、超冷分子拉曼光谱学、分子物质波干涉计量术、纳米分子束刻蚀术及其纳米新材料的研制等。因此,年轻的与原子光学平行的分子光学研究有着十分重大的科学意义和广阔的应用背景。

激光冷却的基本条件是(1)必须存在一个简单的多能级系统(如二能级或三能级系统)(2)在这个多能级系统中,光子的“吸收-辐射”跃迁循环必须是封闭的(3)这一跃迁循环过程必须是耗散的,并且是可以多次重复的。由于中性原子在共振或近共振光场中较为稳定,而且能级简单,采用一个或两个激光束就能满足上述激光冷却条件,在大量的跃迁循环过程中实现光子与原子间动量的有效交换,从而导致原子运动速度的降低(原子温度冷却),目前原子冷却温度已达约 3 nK。

然而,虽说激光囚禁与操控“中性分子”已有不少成功的实验报道,但是有关中性分子的激光冷却至今却尚未取得突破性进展。其原因主要有(1)由于分子能级相当复杂,即使是最简单的双原子分子,除了电子能级外,还有分子的振动与转动能级,因而难以用一个或两个激光束来满足上述激光冷却要求的重复跃迁条件(2)由于从分子激发态到电子基态的其他振动能级的离共振荧光跃迁是不可避免的,阻碍了分子与光子间动量的有效交换(3)分子在近共振光场中容易被光分解,导致分子的不稳定。虽然如此,由于超冷分子物理与分子光学,如同超冷原子物理与原子光学一样,有着十分重要的科学研究意义和广阔的应用前景,有关中性分子的各种冷却、囚禁与操控的理论、实验及其应用研究仍然得到了快速发展,并取得了一些可喜的实验结果与进展。对此,本文将就“分子光学”的研究内容、冷分子源

的实验产生、超冷分子物理学、超冷分子光谱学、非线性分子光学、量子分子光学和分子光学的应用前景等作一简单介绍与综述,希望起到抛砖引玉的作用。由于篇幅有限,有关“分子冷却、囚禁与操控的实验研究概况及其最新进展”将另文介绍。

2 分子光学及其研究内容

何谓分子光学?类似于光子光学、电子光学、离子光学与原子光学的定义,分子光学是研究中性分子与电场、磁场和光场等物质相互作用及其冷却、囚禁、操控与应用的一门新兴学科。

根据光子光学和原子光学的类比,分子光学的分类及其研究内容可简述如下(见表1):

表1 分子光学的分类及其研究内容

分类	主要研究内容
分子光学基础	冷分子束的产生及其中性分子冷却与囚禁的理论、实验与技术等
几何分子光学	分子激光排列、冷分子束的偏转(折射)、反射、导引和聚焦成像等
波动分子光学	分子物质波的衍射、干涉、波导和全息学及其分子波包动力学等
集成分子光学	分子微波导、微囚禁、分子芯片、微阱分子 BEC 和微束分子激光等
非线性分子光学	分子孤子、分子混沌、分子物质波四波混频及其与光波的混频等
量子分子光学	分子 BEC、分子激光、分子相干性和分子纠缠态、分子 EPR 态等
应用分子光学	分子束刻蚀、超冷分子钟、分子干涉计量与分子光学器件的研制等
超冷分子物理	分子冷碰撞性质及超冷分子与电、磁、光场相互作用中的物理问题
超冷分子光谱学	无多普勒分子光谱学、光子缔合光谱学和超冷分子非线性光谱学等
超冷分子化学	超冷分子合成、光解、光化学与化学反应动力学及超冷量子化学等

其中分子光学器件主要包括:分子导管、分子漏斗、分子镊子、分子反射镜、分子透镜、分子光栅、分子分束器、分子干涉仪、分子马达、分子开关等。

由于分子是保持物质化学属性的基本单元及其分子内部结构(自由度数目,振动与转动能级等)的复杂性,与原子光学相比,分子光学还具有如下一些独特的物理研究内容与技术难点。

首先,由于分子内部能级的复杂性,分子除了具有平动(速度)动能以外,还有振动与转动(速度)动能,因而分子束或分子气体样品除了具有平动温度以外,还有振动与转动温度。这对于分子物质波的干涉与衍射及其超低温条件下的分子化学和反应动力学将产生一定的影响,从而导致一个新的“超冷分子化学”研究分支的诞生,同时也增加了我们操控中性分子与测量分子速度及其温度的技术难度。

其次,正是由于分子内部能级的复杂性及其独特的物理性质(如极性分子具有的永久电偶极矩等),使得中性分子冷却、囚禁与操控的物理机制在某些方面不同于原子冷却、囚禁与操控的机制,也给分子光学实验增加了技术难度。特别是中性原子的激光冷却机制、方法与技术无法照搬到中性分子的激光冷却中来,以至于中性分子的激光冷却至今尚未在实验上取得突破性进展。由于篇幅关系,这将另文详细介绍。

最后,也是由于分子内部能级的复杂性,使得超冷分子光谱学远比超冷原子的光谱学丰富得多,它不仅具有紫外、可见和红外(振动-转动)吸收光谱,还有(振动-转动)拉曼散射光谱及非线性光谱等,相应的超冷分子光谱实验技术也复杂得多。特别是超冷分子光谱具有无多普勒展宽的超高分辨率,而且其光谱信息十分丰富,具有广阔的应用前景。因此,分子光学的研究内容要比原子光学的内容丰富有趣得多,相应的实验研究技术也要难得多。

3 冷分子束的形成与超冷分子样品的实验制备

3.1 冷分子束的形成

通常人们采用超声分子束技术来产生具有约 3K 的冷分子束。实验装置如图 1 所示。图中 O 为分子炉, N 为喷嘴, S 和 C 构成准直器。

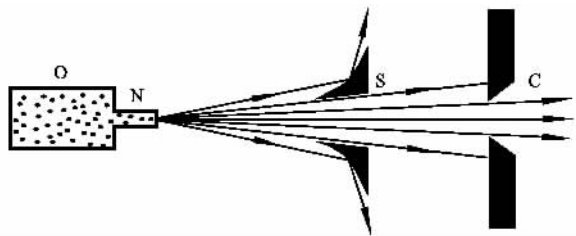


图 1 超声分子束源实验装置

超声分子束装置产生冷分子束的原理可简述如

下^[6]:由于分子炉内外的压强差,使气体分子从管口喷射出并迅速地绝热膨胀,结果分子无规热运动的能量转化为定向运动的能量,使得分子沿轴向加速,与此同时,分子束被迅速地绝热冷却,形成一超声冷分子束(其平动温度约为 3K)。所产生的分子束强度由下式给出:

$$I = (p/4kT)S\sqrt{8kT/m\pi} \quad (1)$$

这里 p 和 T 分别是分子炉中的分子气体压强与温度, m 为分子质量, S 为喷嘴(N)的面积。适当选择喷嘴(N)与准直器(SC)的几何尺寸与相对位置,即可获得单色性好、发散角小的超声分子束。

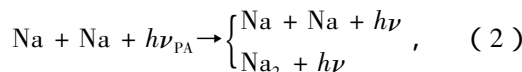
此外,为了获得更低温度的冷分子束,可以采用所谓的斯塔克减速器来进一步冷却超声分子束,目前冷却温度已达 $250\mu\text{K}$ ^[7]。

3.2 超冷分子样品的制备

通常可采用如下两种方法产生具有 $0.1\mu\text{K}$ — 0.1mK 温度的冷分子或超冷分子样品。

3.2.1 在磁光阱(MOT)中产生冷分子样品(20 — $100\mu\text{K}$)

其基本原理为,首先利用激光冷却技术在磁光阱(MOT)中制备一个冷的原子样品(10 — $30\mu\text{K}$),然后在磁光阱、光阱或磁阱中采用光子缔合光谱技术产生冷分子样品。所谓光子缔合光谱技术,就是利用一个光子与两个基态原子之间的三体碰撞复合,形成一个稳定的双原子分子。以 Na 分子的产生为例,即有反应方程式:



式 $h\nu_{\text{PA}}$ 中为一附加的光子缔合(photon association, PA)激光束的光子能量。由此可见,两个激光冷却的基态 Na 原子与一个缔合光子的三体碰撞复合结果是一部分 Na 原子合成并转化为冷的 Na_2 分子,另一部分 Na 原子仍以原子形式存在于势阱中。在实验中,通过压缩磁光阱(MOT)提高原子密度,来提高冷分子的产生速率,通过实验参数的优化,来提高冷分子产生的几率(或比例)。目前采用该技术已经产生了超冷的 H_2 分子^[8], He_2 分子^[9], Li_2 分子^[10], Na_2 分子^[11], K_2 分子^[12], Ca_2 分子^[13], Rb_2 分子^[14] 和 Cs_2 分子^[15,16] 等双原子样品,相应的冷分子产生速率已达到 10^5 个分子/秒,冷分子产生的几率(或比例)达到 50% 以上,最低的分动温度约为 $20\mu\text{K}$ (Cs_2 分子)。

3.2.2 在 BEC 中产生超冷分子样品 (0.1—10 μ K)

1998 年,一个跨国理论小组(由美国、英国和以色列科学家组成)提出了一种在碱金属原子 BEC 中采用受激拉曼光子缔合光谱技术产生超冷分子的新方法^[17]。2000 年,美国德州大学的 Heinzen 小组在⁸⁷Rb 原子 BEC 中采用该技术产生了温度为 0.1 μ K (100 nK)的超冷⁸⁷Rb₂ 分子,这也许是宇宙中最冷的分子,为分子 BEC 的实现提供了一种新的技术手段^[18]。同年美国 Rice 大学的 Hulet 小组采用类似的技术在⁷Li 原子的 BEC 中产生了超冷的⁷Li₂ 分子^[19]。由于采用上述技术产生超冷分子的速率较低,2002 年美国国家计量标准实验室(NIST)的 Phillips 小组采用单光子缔合光谱技术在²³Na 原子 BEC 中产生了超冷的²³Na₂ 分子,相应的超冷分子产生速率达到约 1.6×10^5 分子/秒^[20]。最近,美国国家实验室(JILA)的 Wieman 小组利用脉冲磁场感应的 Feshbach 共振技术在⁸⁵Rb 原子 BEC 中产生了超冷的⁸⁵Rb₂ 分子,并进行了原子-分子相干性的实验研究^[21]。

4 超冷分子物理与光谱学的研究

4.1 超冷分子碰撞性质的研究

冷分子或超冷分子间的碰撞可分为弹性碰撞与非弹性碰撞,相应的研究主要包括(1)不同电子超精细基态间的冷碰撞(2)电子基态与激发态间的冷碰撞(3)不同振动态间的冷碰撞(4)不同转动态间的冷碰撞(5)振动与转动态间的冷碰撞等。分子冷碰撞研究的目的在于了解分子的内部结构,测量各种冷碰撞的散射截面以及损耗速率常数等,为实现超冷分子的囚禁与操控及其分子 BEC 等提供实验依据。有关分子冷碰撞的研究内容及其最新进展可参阅文献[22]。

随着原子与分子冷却技术的发展,超冷原子与分子间的碰撞问题已成为目前超冷分子物理研究的热点之一。例如,超冷原子与转动激发的双原子分子间的冷碰撞可以实现分子内部振动与转动能级的能量转换,尤其当碰撞时间远大于转动周期时,这种能量转换将非常有效^[23,24];最近,美国德州大学的 Heinzen 小组在⁸⁷Rb 原子 BEC 中首次测量了⁸⁷Rb 分子与⁸⁷Rb 原子凝聚体间碰撞的散射长度,并开展了凝聚铷原子与超冷铷分子间的冷碰撞研究^[18]。他们的研究表明,超冷铷分子与凝聚铷原子间的非弹性碰撞将导致受激 Raman 谱线的展宽,从而缩短铷分子在转动-振动能级的寿命,使得分子凝聚体

(分子 BEC)即使形成也在非常短的时间内崩塌。为了实现分子 BEC 及其分子激光,有关凝聚原子与超冷分子间相互作用的理论研究已成为超冷分子物理研究中的另一个最新热点^[25,26]。

此外,超冷分子的光散射也是超冷分子物理研究的主要内容之一,它主要研究超冷分子在光场(或光阱)中的自发辐射及其光散射性质,例如自发辐射或光散射导致的分子加热和消相干效应等。了解这些性质对于分子 BEC 的实现,超冷分子的量子操控与干涉计量应用及其分子消相干与纠缠的控制^[27]等有着重要的意义。

4.2 冷分子束或超冷分子光谱学的研究

超声分子束激光光谱学是 20 世纪 70 年代发展起来的利用超声分子束(分子平动温度约为 3K)进行分子激光光谱研究的一种实验光谱技术,可分为激光感生荧光光谱技术、多光子电离光谱技术和相干拉曼光谱技术等,主要用于稳定分子光谱学、范德瓦耳斯分子光谱学、自由基光谱学和光碎片光谱学等的实验研究。目前国内已有中国科学院化学研究所、中国科学院安徽光学精密机械研究所、中国科学技术大学等单位从事超声分子束光谱学及其应用研究。

冷分子束光谱学指的是采用冷却的冷分子束(温度为 0.1mK—0.1K)所进行的分子激光光谱研究,而超冷分子光谱学指的是采用冷却的超冷分子样品(温度为 0.1 μ K—0.1mK)所进行的分子光谱研究。相应的光谱技术包括高分辨的光子缔合光谱技术^[28]、双色光子缔合光谱技术^[29]和受激拉曼光子缔合光谱技术^[18,28]以及其他常规光谱技术,主要用于产生超冷分子样品,或研究超冷分子的光谱结构、振-转能级及其冷碰撞性质等。由于分子温度很低,相应的多普勒展宽可被部分地甚至全部消除,因而冷分子束或超冷分子光谱术可望获得更高的光谱分辨率。

5 非线性与量子分子光学研究

5.1 非线性分子光学

最近,Drummond 等人提出了一个实现相干分子孤子的理论方案^[17],并进行了相应的理论研究^[30]。在他们的方案中,首先产生一个原子 BEC,然后通过 Feshbach 共振技术或受激拉曼光子缔合光谱技术获得一个分子 BEC,并通过原子 BEC 与分子 BEC 间的非线性相互作用,耦合输出一个稳定的分子孤子激光。另一个十分有趣的相反的非线性过程

是通过分子 BEC 的光子离解产生的一对量子相关的孪生原子激光束(包括分子的自位相调制),最近被 Kheruntsyan 等人提出并进行了相应的理论研究^[31]. 他们的研究结果表明,当原子损耗为 10% 时,一对具有 93% 振幅压缩量的相反方向传播的孪生原子激光束将可从分子 BEC 中产生.

此外,一个采用缓冲气体冷却的冷分子束可用于增强高阶谐波产生的非线性光学效应^[32]. 初步实验结果显示,对于激光排列的 CS₂ 分子,其非线性光学效应可增强约 18%. 除了上述相干分子孤子的研究外,非线性分子光学的理论研究还包括在下述的分子纠缠态和分子 EPR 态等的研究中,这是因为任一分子量子态的产生或制备必然与一个非线性分子光学过程相关联.

5.2 量子分子光学

自从 1998 年 Drummond 等人提出实现分子 BEC 的思想、2000 年美国德州大学的 Heinzen 小组在 ⁸⁵Rb 原子 BEC 中产生第一个超冷铷分子样品以来,有关分子 BEC 的产生及其分子激光的耦合输出引起了人们的极大兴趣,一系列理论文章相继问世. 这些研究工作主要包括混合原子-分子 BEC 的类液体性质^[33], 耦合原子-分子 BEC 的动力学及其多模动力学^[34, 35], 利用 Feshbach 共振或光学晶格实现分子 BEC^[36, 37], 分子 BEC 光子离解中的选择放大^[38] 等. 此外,一些新的化学概念,如超冷化学和玻色增强化学甚至超冷量子化学等被相继提出,这些工作有可能形成一个新的有关“冷化学”或“超冷化学”研究的分支学科或新的研究方向.

在实验研究方面,美国国家实验室(JILA)的 Wieman 小组利用脉冲磁场感应的 Feshbach 共振效应在 ⁸⁵Rb 原子 BEC 中研究了基态 ⁸⁵Rb 原子与所产生的超冷 ⁸⁵Rb₂ 分子之间的相干叠加态及其量子力学干涉^[21]. 在他们的实验中,Wieman 等人利用两个具有可调的一定时间间隔的磁场脉冲实现了一个类似于“时域物质波干涉仪”^[39]的一对基态 ⁸⁵Rb 原子(凝聚态)与超冷 ⁸⁵Rb₂ 分子之间的量子干涉,在 ⁸⁵Rb 原子 BEC 中观测到了基态 ⁸⁵Rb 原子数的周期性变化,类似于时域物质波的干涉条纹. 这说明被观测的一对基态 ⁸⁵Rb 原子在原子凝聚态与超冷分子态之间来回震荡,或者说系统处于原子与分子的相干量子叠加态. 这里两个具有一定时间间隔的磁场脉冲构成了一个时域物质波干涉仪^[39],其中第一个磁场脉冲的作用是首先通过 Feshbach 共振(碰撞)产生一定比例的超冷 ⁸⁵Rb₂ 分子(此时一对基态 ⁸⁵Rb 原

子与一个 ⁸⁵Rb₂ 分子处于量子叠加态);然后分束,使得一对基态 ⁸⁵Rb 原子与一个 ⁸⁵Rb₂ 分子分别沿着干涉仪的两臂相干传输;最后在第二个磁场脉冲到来时在干涉仪的合成叠加处通过碰撞观测原子与分子之间的量子干涉结果. 这是目前国际上第一个有关量子分子光学研究的漂亮实验.

最近,分子纠缠态^[40]和分子 EPR 态^[41]等分子量子态的制备以及采用超冷分子的量子计算方案^[42]被相继提出,并正在成为量子分子光学研究中的又一新的热点.

6 分子光学的应用前景

众所周知,如果采用超冷原子替代光子进行精密测量,则在理论上其测量灵敏度为

$$S\left(\frac{\text{原子}}{\text{光子}}\right) \propto \frac{Mc^2}{\hbar\omega} \approx 10^{11}, \quad (3)$$

即灵敏度可提高 11 个数量级. 但是考虑到一些实际限制,目前实验上已提高了 2 个数量级. 人们相信经过实验条件与环境的改善以及实验技术的改进后,将来可望提高到 10⁶ 量级. 由于同种元素的超冷分子质量比超冷原子质量至少大 2 倍,有些大分子(如 C₆₀, C₇₀ 等)要比同元素的 C 原子重几十倍,甚至上百倍,故采用同元素的超冷分子进行精密测量,则测量灵敏度又可提高 2 至 100 倍. 因此,超冷分子物理与分子光学如同超冷原子物理与原子光学一样有着更加广阔而又重要的应用前景. 简单归纳起来,超冷分子及其分子光学技术将可广泛应用于:

(1) 基本物理问题的实验研究(包括分子冷碰撞性质的研究)^[18-26];

(2) 基本物理常数的精密测量^[43](包括超冷分子钟^[44]和二级光频标的建立);

(3) 超短脉冲激光的位相调制^[45]和光学非线性效应的增强^[32];

(4) 单个超冷分子与分子波包动力学的相干操控及其应用^[46];

(5) 分子物质波干涉计量技术及其在精密测量中的应用^[47];

(6) 纳米分子束蚀刻术及其在纳米新材料研制中的应用^[48];

(7) 分子 BEC, 分子激光与超冷分子的简并费米气体^[49], 分子纠缠态^[40]和分子 EPR 态^[41]在量子信息光学中的应用;

(8) 超冷分子光谱技术及其在超冷分子化学、

分子碰撞性质研究与光学精密测量中的应用^[49];

(9) 微结构集成分子光学及其分子芯片在量子计算^[42]与量子信息处理中的应用;

(10) 分子光学器件在上述实验研究中的应用(包括分子操控与分子马达及其同位素分离技术^[50]等);

此外,由于分子是保留物质化学属性的最小单位,也是跨接物理学和化学及其他交叉学科的桥梁,因此,超冷分子物理与分子光学及其超冷分子光谱学在化学、天文学、环境科学、材料科学,甚至生物学等领域中也有着潜在的应用前景。

参 考 文 献

[1] Adams C S *et al.* Phys. Rep. ,1994 ,240 :143
 [2] Meystre P ,Atom Optics. Springer Verlag ,2001.1
 [3] 王义道. 物理 ,1990 ,19(7) :389 ;19(8) :449[Wang Y Q. WuLi (Physics) ,1990 ,19(7) :389 ;19(8) :449 (in Chinese)]
 [4] 李师群. 大学物理 ,1999 ,18(1) :1 ;18(2) :1 ;18(3) :1 [Li S Q. College Physics ,1999 ,18(1) :1 ;18(2) :1 ;18(3) :1 (in Chinese)]
 [5] Baldwin K G H. Aust. J. Phys. ,1996 ,49 :855
 [6] 霍炳海. 大学物理 ,1999 ,18(1) :38 [Huo B H *et al.* College Physics ,1999 ,18(1) :38 (in Chinese)]
 [7] Crompvoets F M H *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2002 ,89 :093004 -1
 [8] Mosk A P *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1999 ,82 :307
 [9] Herschbach N *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2000 ,84 :1874
 [10] McAlexander W I *et al.* Phys. Rev. ,1995 ,A 51 :R871
 [11] Blange J J *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1997 ,78 :3089
 [12] Nikolov A N *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2002 ,84 :246
 [13] Zinner G *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2000 ,85 :2292
 [14] Gabbanini C *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2000 ,84 :2814

[15] Fioretti A *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1998 ,80 :4402
 [16] Takekoshi T *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1998 ,81 :5105
 [17] Drummond P D *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1998 ,81 :3055
 [18] Wynar R *et al.* Science ,2000 ,287 :1016
 [19] Gerton J M *et al.* Nature ,2000 ,408 :692
 [20] McKenzie C *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2002 ,88 :120403 -1
 [21] Donley E A. Nature ,2002 ,417 :529
 [22] Brunger M J *et al.* Phys. Rep. ,2002 ,357 :215
 [23] Forrey R C *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1999 ,82 :2657
 [24] Forrey R C *et al.* Phys. Rev. ,2001 ,A64 :022706 -1
 [25] Cusack B J *et al.* Phys. Rev. ,2001 ,A65 :013609 -1
 [26] Holland M *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2001 ,86 :1915
 [27] Kurizki G *et al.* J. Opt. ,2002 ,B 4 :S294
 [28] Pillet P *et al.* Laser Physics ,2001 ,11 :480
 [29] Tsai C C *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1997 ,79 :1245
 [30] Javanainen J *et al.* Phys. Rev. ,1999 ,A59 :R3186
 [31] Kheruntsyan K V *et al.* Phys. Rev. ,2002 ,A66 :031602 -1
 [32] Velotta R. Phys. Rev. Lett. ,2001 ,87 :183901 -1
 [33] Timmermans E *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1999 ,83 :2691
 [34] Heinzen D J *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2000 ,84 :5029
 [35] Goral K *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2001 ,86 :1397
 [36] Kokkelmans S J J M F *et al.* Phys. Rev. ,2001 ,A63 :031601 -1
 [37] Jaksch D *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2002 ,89 :040402 -1
 [38] Moore M G *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2002 ,88 :160402 -1
 [39] Zoller P. Nature ,2002 ,417 :493
 [40] Helmerston K *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2001 ,87 :170402 -1
 [41] Kruger T. Eur. Phys. J. ,2001 ,D14 :299
 [42] DeMille D. Phys. Rev. Lett. ,2002 ,88 :067901 -1
 [43] Hudson J J *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2002 ,89 :023003 -1
 [44] Ye J *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2001 ,87 :270801 -1
 [45] Bartels R A *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2002 ,88 :013903 -1
 [46] Bartels R A *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2002 ,88 :033001 -1
 [47] Chapman M S *et al.* Phys. Rev. Lett. ,1995 ,74 :4783
 [48] Dey B K *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2000 ,85 :3125
 [49] Bahns J T *et al.* Adv. At. Mol. Opt. Phys. ,2000 ,42 :171
 [50] Villeneuve D M *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2000 ,85 :542



· 物理新闻与动态 ·

可伸展的金导体

当工程师们为了制造一些奇特形状的元素(如能激发光敏元件的视网膜片)或者是制造一些与皮肤或柔软表面相接触的传感器时,都需要一种能伸展的金属材料.最近美国普林斯顿大学的 S. Lacour 教授和他的研究组首次得到了一种新的可伸展的金导体.他们在二甲基硅氧烷(PDMS)的感光胶层上沉积了100nm厚的金薄膜.在制作过程中,他们在基底上放上了5nm厚的铬是为了能帮助金更好地附着在PDMS上.这种塑性材料广泛地应用于微电子的科研与生产上.科学家们在沉积金时发现,如果金膜受到压缩应力,就会使薄膜发生弯曲,从而使金膜表面形成平行的皱折.要想把这些皱折抹平,就要对薄膜作10%的拉伸或延展.但令人惊奇的是,若对薄膜作20%—30%的拉伸,也就是已超过它的弛豫长度的拉伸,金薄膜仍然可保持很好的导电性.我们知道,一片简单的金薄膜,只要对它进行1%的拉伸,在薄膜表面会发生裂纹,甚至于发生断裂.而对这种塑性薄膜进行拉伸时也会产生裂纹,但却不影响它的导电性能.因此科学家们猜测这类塑性金薄膜有可能只要有一个金分子的厚度就能在裂纹之间架起桥梁,形成电流通道.只有这样才能说明拉伸后的金薄膜仍然具有导电性能的特点.当然还需要在今后用实验来证实这个猜测.

(云中客 摘自 Applied Physics Letters ,14 April 2003)