

原子激光器与非线性原子光学:现代原子物理学的新进展*

邓 鲁

(美国国家标准与技术研究所)

摘要 介绍了当前原子物理实验研究的两项最新突破:准连续全方位可调谐原子激光器(又称原子激光器)以及世界第一个非线性原子光学实验.前者在实现高亮度、高相干性原子激光器的研究方面迈出了极其重要的一步,后者则首次证明了物质波的多波混频效应,从而开辟了一个崭新的研究领域.

关键词 原子激光器,玻色-爱因斯坦凝聚,非线性原子光学,四波混频

ATOM LASERS AND NONLINEAR ATOM OPTICS

DENG Lu

(Atomic Physics Division, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland 20899, USA)

Abstract Two recent experimental breakthroughs in the field of atomic physics are reported: the realization of a well-collimated, widely tunable, quasi-continuous wave atom laser, and the generation of matter waves via coherent multi-wave mixing. The former is a critical step towards a continuous wave, high brightness atom laser while the latter has opened a new field of research: nonlinear atom optics.

Key words atom laser, Bose-Einstein condensate, nonlinear atom optics, four-wave mixing

1999年3月,两篇具有重大突破意义的现代物理实验报道^[1,2]相继刊登在全球科技界最负声望的《科学》和《自然》杂志上,引起了很大的轰动.仅在两个月内就已被多国多家电台、电视台、报刊、杂志所转载报道,并由美国物理学会在建会100周年纪念时举办了专题新闻发布会.

以 E. W. Haglely 博士和本文作者为首的美国国家标准与技术研究所(NIST Gaithersburg)激光研究组在组长——1997年诺贝尔物理学奖获得者 W. D. Phillips 博士的领导下,成功地研制出世界第一台全可控、可调谐物质波激光器,并成功地完成了世界第一个物质波混频实验,不仅实现了物质波激光器研制领域的重大跃进,并且开创了一门崭新的现代物理学研究领域:非线性原子光学.

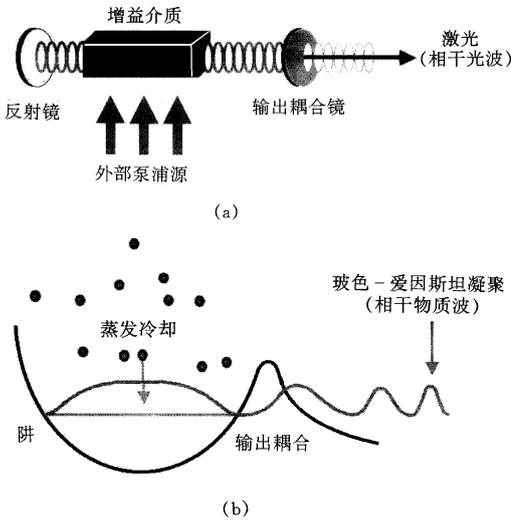


图1 (a) 光学激光;(b) 原子激光

1 什么是物质波激光器?

物质波激光器,又称原子激光器(atom laser),可以发射出高密度、高相干性、低发散度原子束,其在光学上的对应是人们所熟知的光激光器(通称激光器)(图1).原子激光器的核心部分是大量聚集在

同一量子力学态上的原子,这种现象称为玻色-爱因斯坦凝聚(Bose-Einstein condensate, BEC).这种凝聚物质仅存在于极低的温度下.随着温度的降低,

* 1999-09-28 收到
作者 E-mail: lu.deng@nist.gov

原子的运动速度变得越来越慢,当温度达到某临界温度 T_c 时(通常在 $10^{-7} \text{ K} - 10^{-8} \text{ K}$),具有玻色子(自旋为整数)性质的原子将聚集在系统的最低能量态上,形成此种特殊凝聚体. BEC 首先是由 Bose 和 Einstein 于 70 年前所预言^[3],但在实验上一直被认为是原子物理学界尚未被摘取的宝石之一.

由量子力学的德布罗意关系可知,运动物质的波长与其动量满足关系式 $\lambda = h/p$. 以钠原子为例,当 $p = 1 \hbar k$ 时(例如,取 $k = 2\pi/\lambda_L$, $\lambda_L = 589 \text{ nm}$),其相应的速度约为 3 cm/s ,而其对应的物质波(亦称德布罗意波)的波长约为 $\lambda = \lambda_L = 6 \times 10^{-7} \text{ m} = 0.6 \mu\text{m}$ (橙光波长). 通常,经过绝热扩散致冷的原子 BEC 仅有 $0.005 - 0.05 \hbar k$ 的残余动能,相当于 $\lambda = 12 - 120 \mu\text{m}$ 的波长. 在这种情况下,物质波的波动效应将变得非常明显,与波动学相关的实验物理研究可以推广到物质波. 高密度、长相干波长是原子 BEC 的主要特点之一.

在实验上,实现原子 BEC 非常困难. 物理学家们首先联合使用磁场与光波构成的磁-光陷阱俘获低速运动原子. 随后使用困难而复杂的能量交换方法进一步降低原子的动能,以逼近临界温度.

经过多年的艰难努力, NIST 的 Colorado 实验组首先于 1995 年获得铷原子 BEC^[4],为实现原子激光器迈出了决定性的一步. 随后,美国麻省理工学院(MIT)的 Kettle 博士小组亦报道成功获得钠原子 BEC^[5].

实现原子激光器的另一重大困难在于如何有效地耦合输出部分 BEC,并保持其高密度、高相干性和低发散度.

1997 年, Kettle 博士小组首先实现了射频耦合输出 BEC^[6]. 然而,该射频耦合器有着极大的缺陷: (1) 由于地球的引力作用,耦合出的 BEC 的方向与速度完全不可控制(只能任其下落); (2) 由于原子-原子间相互作用,耦合出的 BEC 密度随着传播距离急剧下降(呈散水滴状),即耦合出的 BEC 有着很大的发散性. 因而 MIT 的射频输出耦合器亦可称为被动式耦合输出原子激光器. 1998 年 5 月,本文作者代表 NIST 的 Gaithersburg 研究组首先在国际量子电子学会会议上报道了世界第一台准连续全方位、全可控、可调谐原子激光器,并提出了连续波全可控、可调谐原子激光器的概念、工作原理以及设计构想^[7]. 与 MIT 的射频耦合器相比,由本文作者小组研制的原子激光器^[1]可在水平面上 360° 的任意方位射出,且出射速度可以任意调整. 随着高速度出

射而产生的运动学压缩(kinematic compression)效应极大地改善了物质波束的发散性. 事实上,该全方位、全可控原子激光器的发散角度已达到商品光激光器的精度($< 2 \text{ mrad}$) (图 2)^[1]. 该原子激光器的研制成功为现代原子物理学的科学与技术研究与发

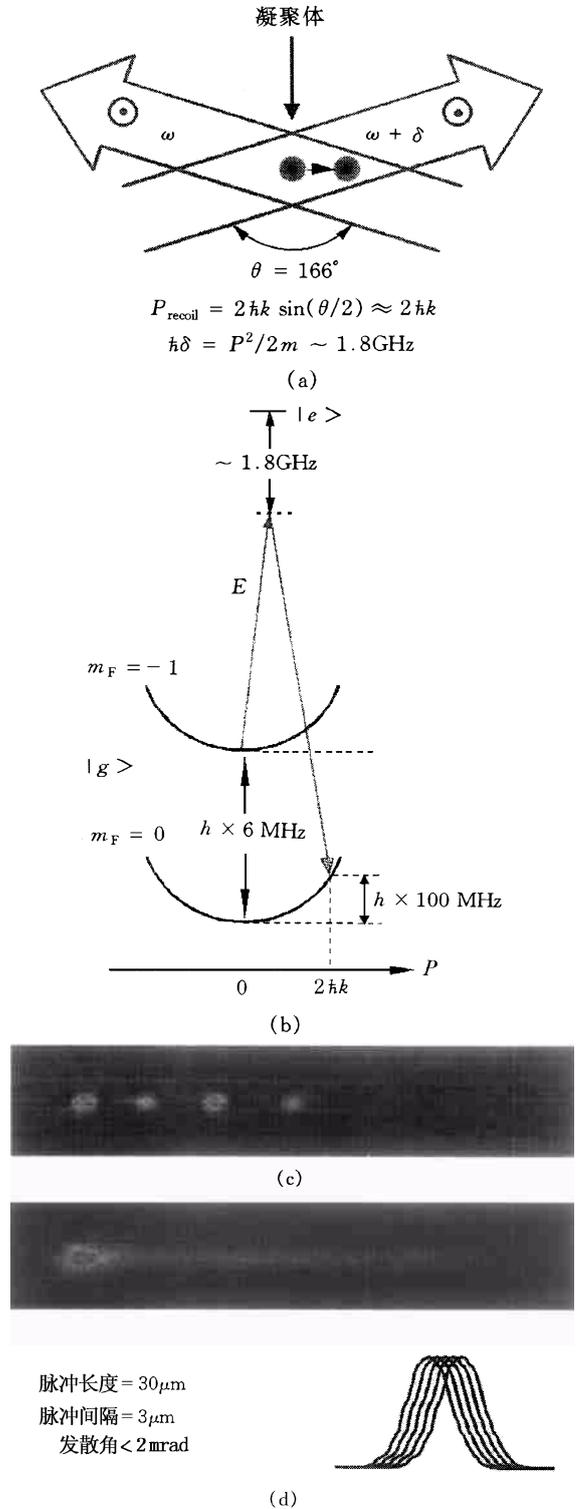


图 2
(a) 实验方法; (b) 拉曼散射原理; (c) 脉冲原子激光; (d) 准连续(CW)原子激光

展创造了先行条件,并被广泛认为是与 60 年代光激光器的发明具有同等的重要性。

2 物质波激光器对基础科学研究的贡献:非线性原子光学的诞生

60 年代初,随着高强度、高相干性光源——光激光器的问世,诞生了一门崭新的学科:非线性光学。非线性光学主要是研究强电磁波与物质之间的非线性相互作用。第一个开创该学科的实验是光的倍频实验。Franken 博士观察到当一束很强的光波(频率 ω)作用在某些非线性物质上时,有频率为 2ω 的光波出现,这就是光的二倍频效应^[9]。随后,研究者们又发现当把 3 束强光(频率为 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$)同时射入某些非线性晶体时,会有频率为 $\omega_4 = \omega_1 \pm \omega_2 \pm \omega_3$ 的光波产生。这就是著名的光的四波混频效应[图 3(a)]^[10]。这些实验奠定了非线性光学的基础。目前,非线性光学已被广泛地应用于物理、化学、生物、医学、工程、通信及其他研究与先进技术发展的领域,成为现代科学技术中不可缺少的一部分。

随着全可控可调谐原子激光器的实现,一个非

常重要的问题呈现在研究者面前:高密度、高相干性的物质波是否会产生非线性波动效应?

把电磁波动方程与物质波动方程作一比较即可理解该问题的来源。强光波在三阶非线性晶体中传播的麦克斯韦方程具有 1 个三阶非线性项: $|A|^2 A$ (A 为电场振幅),该项是产生光四波混频等非线性效应的原因。由于光子-光子间相互作用极弱,光波的非线性效应必须通过非线性介质才能实现。高密度物质波服从的非线性薛定谔方程亦有一类似的三阶非线性项: $|\psi|^2 \psi$ (ψ 为物质波振幅)。在 BEC 中,由于原子-原子间的相互作用较强,物质波本身即起着非线性介质的作用,因而可以产生物质波四波混频等非线性效应。90 年代初,澳大利亚马库里大学张卫平教授与美国亚利桑那大学 P. Myster 教授提出非线性原子光学的概念^[11],预言了物质波的非线性效应的存在。1998 年 9 月, NIST 的 P. Julienne 博士与以色列的 Trippenbach 博士、Band 博士经过大量的计算模拟提出了基态物质波四波混频的可能性^[12]:当 3 束物质波相互碰撞时,在满足动量-能量守恒的条件下可以观察到第 4 束物质波的出现。

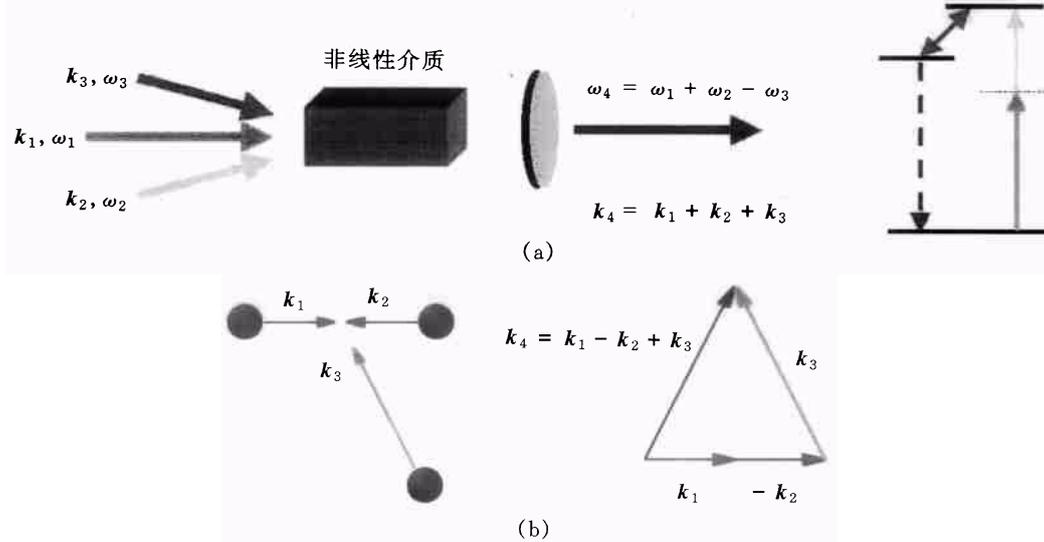


图 3

(a) 非线性光学; (b) 非线性原子光学

从微观动力学的角度来看,物质波四波混频过程可以从粒子的弹性散射与玻色子在临界温度下凝聚的行为来理解:两个来自于第 1 束和第 2 束物质波的原子在第 3 束物质波存在的情况下相互碰撞。由玻色子的凝聚原理可知,第 3 束物质波提供的玻色子海将迫使一个散射后的原子落入其量子态,从而按第 3 束物质波的方向飞出(这是一个与光激光器原理相类似的受激过程)。而动量-能量守恒则要求

另一个原子碰撞后按相反方向飞出,形成第 4 束物质波[图 3(b)]。

然而,物质波的四波混频过程与光波四波混频过程有许多本质上的差别。例如,由于原子不能自动

1) 美国耶鲁大学和德国的 Max-Planck 研究所也报道成功实验出两种不同形式的被动式耦合输出原子激光器,但均存在无法控制的缺陷(前者呈水滴状,后者呈扇状)^[8]

产生和消失,原子数守恒必须得到保证.而在光波四波混频过程中,由于非线性介质可以同时吸收多个光子而放出一个满足能量-动量守恒的光子,故光子数无需守恒.物质波具有不易改变的二次色散关系,而光的色散关系可通过共振条件来调整.对于物质波,实验者总可以找到一个参考系在其中原子处于静止.但该类参考系对于光子不存在.光波不受外界磁场的干扰,而目前实验室中所得到的物质波易受外界磁场的干扰.在技术上,产生3束不同频率的光束很容易,但要在同一磁阱中同时产生3束独立的、具有不同动量的物质波却有着极大的技术困难.这些原因使得在实验上实现物质波的四波混频极为困难.

鉴于上述技术上的困难,本文作者所在小组提出了所谓“半碰撞”方法:首先取得 BEC,然后利用光波的布拉格衍射方法,同时在该 BEC 中产生 3 束不同动量的物质波.由于波束是从同一 BEC 内产生,故波束必定相互重叠,而 BEC 的高相干性亦得到保证.当该 3 束波沿预定方向射出时,在短时间内波的相互重叠可以提供足够物质波间的相互作用,以达到产生混频波的目的.

按照此设想,本文作者所在小组终于首次成功地观察到物质波四波混频波的产生^[2],并且验证了非线性物质波的产生关系,从而奠定了非线性原子光学的基础(图 4).

3 未来的发展

随着原子激光器和非线性原子光学的开创,当今现代原子物理学的发展达到了一个新的阶段.然而,正如 60 年代光激光器和非线性光学刚问世一样,要准确地预测原子激光器和非线性原子光学对未来科学与技术的影响是不可能的.在此本文作者仅摘录部分在西方科技报道中的预测与评论以供读者参考:

“原子激光器将极大地改善现代原子钟的设计和精度,从而将极大地提高卫星导航的精确度.高亮度、高相干性物质波将对半导体光刻技术提供理想的工具,从而将大规模减小集成电路的尺寸,进而大规模提高计算机的速度,并对现有原子光学产生革命性推进.”

“非线性原子光学的创立将对基础原子物理学的研究产生巨大的推动.量子光学的相关联问题在光学中的对应,非经典物质波的产生,物质波的压缩态,物质波的自聚焦、放大、散焦,物质波脉冲传播等一系列问题将成为下一步研究的主要课题.”

参 考 文 献

- [1] Hagley E W *et al.* Science, 1999, 283 :1706
- [2] Deng L *et al.* Nature, 1999, 398 :218
- [3] Bose S N. Z. Phys., 1924, 26 :178; Einstein A, Preus S B. Akad. Wiss, 1924, 22 :261
- [4] Anderson M H *et al.* Science, 1995, 269 :198
- [5] Davis K B *et al.* Phys. Rev. Lett., 1995, 75 :3969
- [6] Mewes M - O *et al.* Phys. Rev. Lett., 1997, 78 :582
- [7] Deng L *et al.* Technical Digest, CLEO/ QELS98, San Francisco: May 3 -8, 1998

(下转第 118 页)

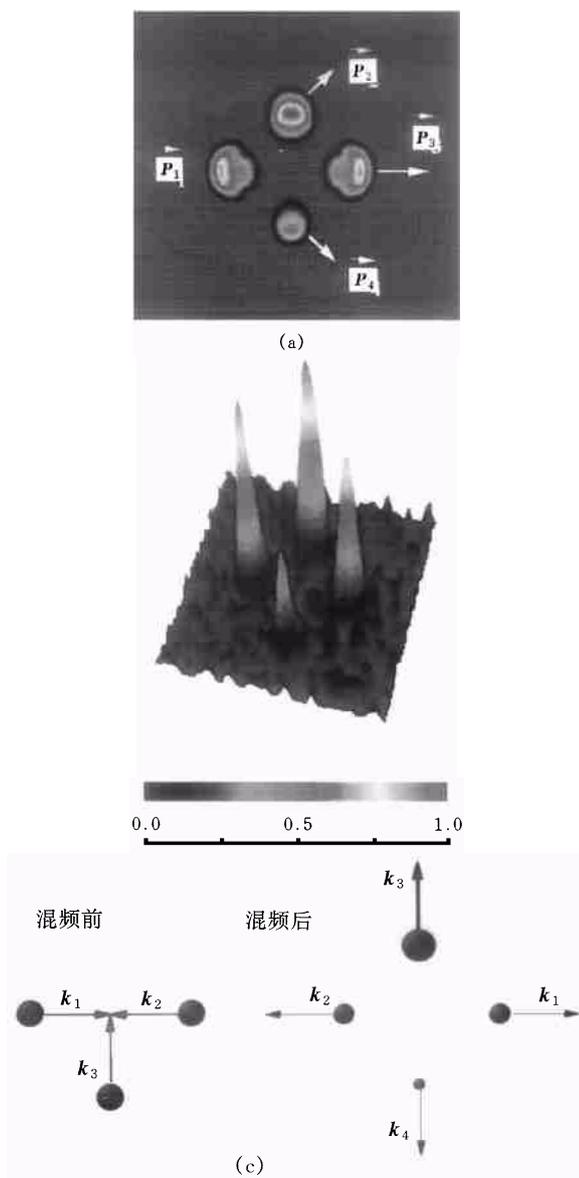


图 4

(a) 数值模拟; (b) 实验图像;
(c) 玻色化模拟($k_1 = -k_2$ 的参考系中)