

原子束计算全息技术的原理与实现^{*}

石建平 陈旭南 高洪涛 陈献忠

(中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 成都 610209)

(2002 年 7 月 19 日收到, 2002 年 8 月 28 日收到修改稿)

提出用计算全息技术来实现原子束全息成像, 降低了原子束全息的实现难度. 首先论述了原子束的波动性质以及如何形成相干性能良好的准单色原子波包, 然后讨论了原子束计算全息片的设计步骤, 并给出了制作完成的 SiN 薄膜计算全息片, 最后详细介绍了原子束全息的实现方案.

关键词: 原子束全息, 计算全息, 磁光冷却

PACC: 4240K, 4240J, 3280P

1. 引言

全息术是 1948 年 Gabor 在研究电子显微镜时发明的, 电子波是一种物质波, 相干性差, 因此发明之初研究进展非常缓慢. 20 世纪 60 年代随着具有高度相干性的激光的出现使得全息技术在光学领域的研究和应用得到了迅速的发展, 远远超过了在物质波领域的研究. 近年来, 随着凝聚态物理的发展, 有关激光冷却原子, 并利用磁场与光波构成的磁-光陷阱捕陷冷却后的低速原子, 使大量原子处于同一量子态上形成玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)的关键技术已经取得重大突破^[1]. 高密度、长相干波长是原子 BEC 的特点之一, 在这种情况下, 物质波的波动效应大大增加, 这就为原子束全息奠定了坚实的理论基础. 1997 年, 美国麻省理工大学学院(MIT)Kettle 博士小组第一次实现了原子 BEC 的耦合输出^[2]. 1998 年, 美国国家标准与技术研究所(NIST)的 Gaithersburg 研究组首先在国际量子电子学会议上报道了世界上第一台准连续、全方位、全可控、可调谐原子激光器^[3]. 这又为原子束全息的实现准备了必要的技术条件. 由于原子波的波长很短, 约纳米量级, 因此原子束全息可望达到极高的分辨力, 在微细加工、生物医学、显微学等诸多技术领域都有着巨大的潜在应用价值. 然而要获得相干性能良好的原子波很不容易, 而且原子波的分束、反射技术也很不成熟, 因

此如果像一般光学全息那样通过引入参考光束来实现原子束全息是很困难的, 所以本文提出采用计算全息技术来实现原子束全息, 它不需要物体、光源、光路、记录介质的实际存在, 就能设计制作出所需的计算全息片, 可以方便的实现原子束全息.

2. 原子束的波动性

由波粒二象性原理可知, 任何运动的实物粒子均可以看成是一种波动, 称着物质波. 原子波就属于物质波范畴, 它是一种概率波, 其运动规律遵从量子力学中的薛定谔方程, 当哈密顿量不显含时间时, 薛定谔方程可以写作

$$\nabla^2 \Psi + k^2 \Psi = 0, \quad (1)$$

$$k = \{ [2mE/\hbar^2] - E(\bar{\omega}) - V(r) \}^{1/2}. \quad (2)$$

这与光的 Helmholtz 方程在形式上是完全一致的. 当在 $E \gg V$ 时, k 的形式可改写为下式:

$$k \approx \sqrt{2mE/\hbar^2} \left[1 - \frac{V(r)}{2E(\bar{\omega})} \right] = k_0 + \Delta k, \quad (3)$$

$$k_0 = \sqrt{2mE/\hbar^2}, \quad (4)$$

$$\Delta k = -\sqrt{\frac{2m}{E\hbar^2}} V(r). \quad (5)$$

一般在热原子情况下, 由于温度较高, 动能很大, 因此 E 很大, $\Delta k \approx 0$. 由以下公式计算热原子的波长:

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2mE}} = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{3mk_B T}}, \quad (6)$$

^{*} 中国科学院知识创新工程项目(批准号:A2K0009)资助的课题.

k_B 为玻耳兹曼常量 ; m 为原子质量 ; T 为温度 ,单位为 K.

(6) 式和原子的德布罗意波长

$$\lambda_{db} = h/mv \tag{7}$$

实际上是统一的 .由统计热力学可知 ,热原子的动能由温度决定即

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}k_B T. \tag{8}$$

将(8)式代入(6)式中就得到与(7)式一致的结果 .

显然 ,在热原子状态下物质波波长极短 ,主要呈现粒子性 ,同时由于热原子的速度服从 Maxwell-Boltzmann 热分布 ,其分布较宽 ,对应的波长分布范围大 ,因而相干性差 ,这种原子束难以用作原子全息源 .只有降低热原子的温度、压缩其速度分布 ,使物质波波长变长 ,波动性增强 ,相干性也提高 ,才可用作原子全息源 .

3. 准单色原子波包的形成

准单色原子波包是指速度分布很窄的大量原子的集合 ,其物质波波长较单一 ,相干性能良好 .原子冷却是形成准单色原子波包的一种有效技术手段 ,冷却的目的是使速度分布变窄、平均速度降低 .本文的冷却方案是采用多普勒冷却^[4]作初步冷却 ,用磁光陷阱^[5-8]作深度冷却 .图 1 是多普勒冷却原理图 .设原子静止时吸收频率为 ω_0 ,则由于多普勒效应 ,当它以速度 v 相对于光波运动时 ,被共振吸收的光波频率应为

$$\omega = (1 - v/c)\omega_0. \tag{9}$$

吸收了光子的原子将跃迁到较高能级 ,处于较高能级的原子不稳定 ,自发辐射光子后再回到基态 ,然后再吸收光子 ,再辐射 ,..... 每吸收一个光子 ,原子都得到与其运动方向相反的动量 ,而自发辐射光子的方向却是随机的(自发辐射是各向同性的) .因而多次重复下来 ,吸收得到的动量随吸收次数增加 ,而自发辐射损失的动量平均为零 ,原子因而减速 .多普勒冷却只能达到 mK 的量级 ,深度冷却用磁光陷阱来实现 ,原理如图 2 所示 .非均匀磁场是由两个平行反向的电流线圈产生的 ,三对两两相对的激光束沿三维坐标轴交会在磁场中心 ,激光的频率相对原子的频率红移 .为简单起见 ,假定原子的跃迁角动量由 $J = 0 \rightarrow J = 1$,在磁场中原子能级将发生塞曼

分裂 ($m = +1, 0, -1$) .以 x 轴为例讨论原子受力情况 ,当 $x < 0$ 时 ,激光的频率更靠近 $m = +1$ 的能级而远离 $m = -1$ 的能级 ,因而散射 σ^+ 偏振的光子较多 ,散射力指向原点 ;当 $x > 0$ 时 ,激光的频率更靠近 $m = -1$ 的能级而远离 $m = +1$ 的能级 ,因而散射 σ^- 偏振的光子较多 ,散射力指向原点 .这样处于同一量子态的原子将被囚禁在磁场零点附近的区域 ,形成准单色的原子波包 .

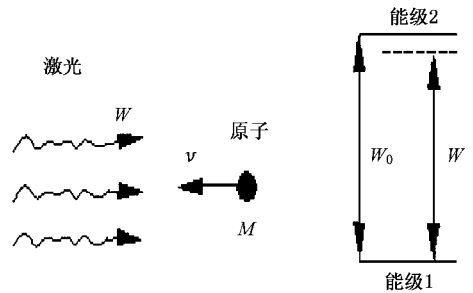


图 1 多普勒冷却原理

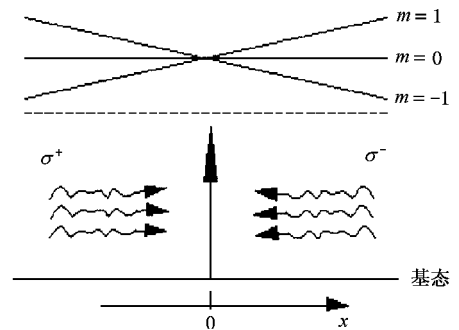


图 2 磁-光阱的工作原理

4. 原子束计算全息片的设计与制作

4.1. 原子束计算全息片的设计

设计时需考虑的因素很多 ,主要有以下几个方面 :

1) 选定与原子束计算全息片的特点相适应的全息图
光学计算全息图种类很多 ,然而原子束计算全息与光学计算全息相比有很多自身的特殊性 ,因此必须要选择合适的全息图才能制作出实际可用的全息片 .原子束计算全息片大致有如下特点 (1) 全息片要为原子所穿过 ,必须是二元的 (2) 在目前的技术条件下 ,要获得准单色原子波包是很困难的 ,即使经过磁光阱冷却的原子束 ,其相干性较之单模激

光仍然小好几个量级,因此在保证像质的情况下,要尽可能的降低对束源质量的要求,这就要求有再现像质量好的编码方式。(3)原子束计算全息再现的图形大约在微米及以下量级,因此要求选择的全息图必须适用于微细图形。综合以上原因,决定采用罗曼 III 型傅里叶变换计算全息图^[9]来制作原子束全息片。图 3 是罗曼 III 型编码的抽样单元,其中 $W_{mn} = \frac{A_{mn}}{\max(A_{mn})}$, $P_{mn} = \frac{\Phi_{mn}}{2\pi}$; A_{mn} , Φ_{mn} 分别为第 (m, n) 单元复数波前的幅值和相位, $C = 1/2$, δu , δv 为抽样单元的宽和高。

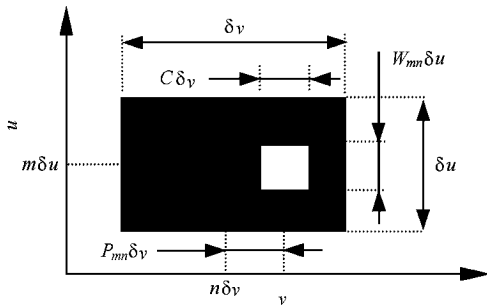


图 3 编码抽样单元

2) 确定目标微细图形数字化的采样点数

采样点数由下式决定:

$$\text{DOT} \geq f_{\max} \cdot \Delta X, \quad (10)$$

式中 f_{\max} 为图形的最高频率, ΔX 为图形沿 x 方向的宽度。一般的可选择 $\text{DOT}_0 = 2f_{\max} \cdot \Delta X$ 。采样得到离散图形数据之后,利用 FFT 算法计算二维傅里叶谱。

3) 确定全息片的大小

全息片的大小和图形的大小满足如下关系:

$$\Delta X \times \Delta X_H = \text{DOT} \lambda L, \quad (11)$$

式中 ΔX , ΔX_H 分别表示图形的宽度和全息片的宽度, λ 为原子波包波长; L 为像面与全息面的距离; DOT 为图形的采样点数。全息片大小的确定主要依据实际工作的需要而定。我们设计的全息片大小为 $0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$, 采样点数 $M \times N = 256 \times 256$ 。为提高再现像的强度,采用四幅合一的设计方法,故制作完成的全息片为 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 。

4) 编码阈值的确定

将采用电子束光刻和 SiN 薄膜生长相结合的方法来制作全息片,编码矩孔能否刻出来是由电子束光刻的分辨力决定的。编码矩孔大小参量有两个:宽度 C 和高度 W_{mn} 。宽度为定值 $1/2$,所以只要给定合

适的 W_{mn} 阈值就能保证所有的编码图形被刻蚀出来。 W_{mn} 的阈值由下式确定:

$$W_{mn(o)} = R \cdot \text{DOT} / \Delta X_H, \quad (12)$$

式中 R 为电子束光刻分辨力, ΔX_H 为全息片的宽度。设分辨率为 $R = 0.1 \mu\text{m}$, $\Delta X_H = 1\text{mm}$, 则 $W_{mn(o)} = 0.025$, 即 $W_{mn} \geq 0.025$ 时编码才能被刻出来,为简化设计,可令

$$W_{mn} = \begin{cases} W_{mn} & \text{当 } W_{mn} \geq 0.025; \\ 0 & \text{当 } W_{mn} < 0.025. \end{cases}$$

5) 生成 CIF 文件

因为要用电子束光刻的方法来制作全息片,所以还必须要把全息图数据转换成 CIF 格式,我们设计了相应的软件来实现。

依据以上的设计思路和步骤,用 C++ 和 MATLAB 语言混合编写了设计计算全息片的程序,设计了“光”字的罗曼 III 型迂回位相编码计算全息片,并转换成 CIF 格式以用于制作。

4.2. 原子束计算全息片的制作

原子波包的波长约为纳米量级,为实现原子束全息,全息片上的编码图形分辨力应优于 $0.1 \mu\text{m}$, 同时选用的薄膜材料柔韧性要好,化学性质稳定,厚度均匀还要尽量薄,以避免阻碍原子运动。因此拟定的制作方案是先采用电子束光刻全息编码矩孔图形,这样可以达到所需的分辨力要求,然后用 ICP 各向异性刻蚀 SiN 薄膜,膜厚度为 $2 \mu\text{m}$ 。制作的主要工序如下 (1) 硅片处理,包括硅片清洁、烘干等 (2) 正面淀积 $2 \mu\text{m}$ SiN 膜层,要求 SiN 的应力很低。采用热壁 LPCVD 法制备 SiN 薄膜,反应剂为 $\text{SiH}_2\text{Cl}_2 + \text{NH}_3$ 体系, LPCVD 设备为 L41950-H/Z 型。预抽真空度为 $1 \times 10^{-2} \text{Pa}$ 然后通过 SiH_2Cl_2 (5% 氩稀释) 和纯 NH_3 气体。气体流量利用质量流量计控制, SiH_2Cl_2 流量为 $750\text{ml}/\text{min}$, NH_3 流量为 $1500\text{ml}/\text{min}$ 。淀积压力为 55Pa , 淀积温度为 $(860 \pm 1)^\circ\text{C}$, 淀积时间可控制成膜厚度,淀积速率一般为 $30\text{—}40\text{nm}/\text{min}$, 最后在 860°C 进行 20min 的原位热处理。(3) 正面蒸发 60nm 厚 Cr 膜 (4) 正面电子束光刻编码图形,数据来源于设计的 CIF 文件,抗蚀剂采用 SAL601 化学放大胶(负胶) (5) 以胶面为掩蔽,用去 Cr 液刻蚀 Cr 膜 (6) 用 ICF(感应耦合等离子体)设备,以 Cr 膜为掩蔽刻蚀 SiN 膜 (7) 硅片清洁处理 (8) 背面双面套准光刻出大于 $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 的方孔,让编码图形位于方孔正中 (9) 用 KOH 溶液在 80°C 下腐蚀背面硅数小时,直

至剩下 SiN 薄膜图形. 图 4 是制作完成的 SiN 薄膜全息片显微照片.

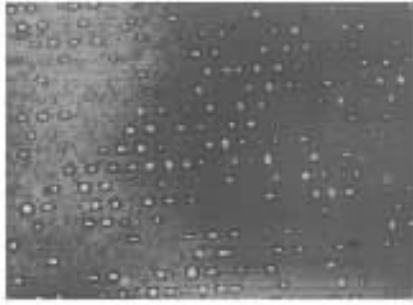


图 4 全息片的局部放大照片

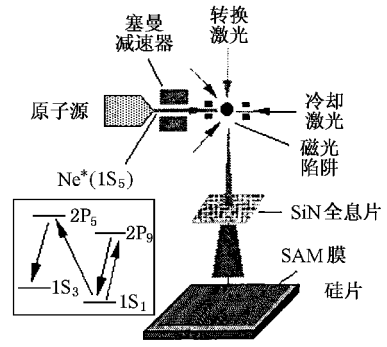


图 5 原子束全息原理图

5. 原子束全息的实现

实现方案如图 5 所示,用亚稳态氖原子来实现. 当氖原子束源产生的亚稳态(1s₅)氖原子穿过塞曼线圈时,被一反向的与(1s₅—2p₀)跃迁频率相同的冷却激光束(cooling laser)减速.线圈提供了一个空间变化的磁场,使原子在减速过程中,跃迁频率的塞曼频移正好与多普勒频移相抵消.紧接塞曼减速器是磁光陷阱(1s₅)态的氖原子受陷阱作用将在磁场的零点区域聚集形成原子云.在一束与(1s₅—2p₅)跃迁频率相同的释放激光(releasing laser)的照射下,原子云中的原子跃迁至 2p₅ 态,由于 2p₅ 态的原子不稳定,自发辐射后二分之一跃迁到基态,二分之一跃迁到 1s₃ 态.基态和 1s₃ 态的原子不受磁光陷阱的作用,在重力作用下垂直下落,形成准直单色的原子波包.原子波包穿过刻透的 SiN 薄膜计算全息片后就会在基底堆积再现出设计的物波面形状,从而实现了原子束的全息成像.基底上用 SAM 膜作抗蚀剂观察再现的图形.

图 6 是原子束全息实验系统结构框图,该系统由以下几个分系统组成:氖原子束流发生器、超高真空系统、声光调制系统、激光稳频系统、塞曼速度压缩器、原子束准直冷却系统、薄膜全息片系统、三维

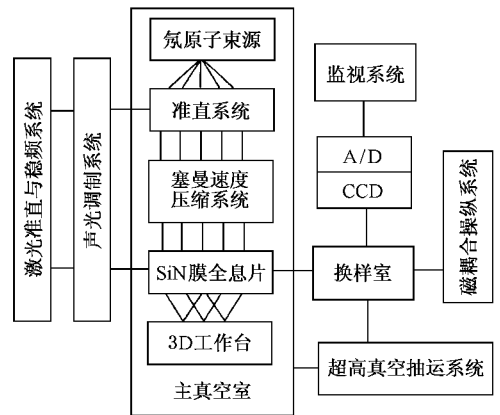


图 6 实验系统结构框图

样品调节平台、主工作室、换样室、磁耦合样品传递系统、监测系统等等.

6. 结 论

原子的物质波波长约为纳米量级,因此原子束全息有着潜在的高分辨力,在微细加工、生物医学、显微学等很多技术领域的应用前景十分看好.本文提出的这种实现原子束全息的方法——原子束计算全息技术,它不需要物体、光源、光路、记录介质的实际存在,就能设计制作出所需的计算全息片,降低了原子束全息的实现难度.

[1] Davis K B, Mewes M O, Andrews M R et al 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 3969
 [2] Mewes M O, Andrews M R, Kum D M et al 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 582

[3] Deng L 1999 *Nature* **398** 218
 [4] Ashkin A 1999 *Optics & Photonics News*(May) p41
 [5] Petrich W, Anderson M H, Ensher J R et al 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 3352

- [6] Adams C S , Lee H J , Davidson N *et al* 1995 *The Amer. Phys. Soc.* **74** 3577
- [7] Hou J D , Li Y M , Yang D H *et al* 1998 *Chin. Phys.* **7** 881
- [8] Ying J P , Gao W J , Wang Y Z *et al* 2000 *Chin. Phys.* **9** 342
- [9] Lee W H 1977 *Appl. Opt.* **19** 639

The theory and realization of atomic beam CGH^{*}

Shi Jian-Ping Chen Xu-Nan Gao Hong-Tao Chen Xian-Zhong

(*State Key Laboratory of Optical Technologies for Microfabrication , Institute of Optical and Electronics ,
Chinese Academy of Sciences , Chengdu 610209 , China*)

(Received 19 July 2002 ; revised manuscript received 28 August 2002)

Abstract

The realization of atom-beam holography by computer generated hologram have been presented in this paper , which can decrease the difficulty of the atom holography . Firstly the wave nature and cooling mechanism of atoms are analyzed , then the design process and a facture of the atomic SiN film hologram is shown , and finally we present a theoretical plan and the picture of an experiment system .

Keywords : atom hologram , computer generated hologram , magnetic-optic cooling

PACC : 4240K , 4240J , 3280P

^{*} Project supported by the Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (Grant No. A2K0009).