

原子束多光束干涉实验的一种方法*

高鸿奕¹⁾ 陈建文¹⁾ 谢红兰¹⁾ 陈 敏¹⁾ 肖体乔²⁾ 朱佩平³⁾ 徐至展¹⁾

¹⁾中国科学院上海光学精密机械研究所,上海 201800)

²⁾中国科学院上海原子核研究所,上海 201800)

³⁾中国科学院高能物理研究所,北京 100039)

(2001 年 9 月 2 日收到 2001 年 11 月 30 日收到修改稿)

提出了一种实现原子物质波干涉的新设想.采用一个菲涅耳波带片来压缩原子束线宽,以此照明一块刻有四缝的铜箔,观察原子束的干涉和全息现象,用来测量原子束的时间相干长度.

关键词:原子束,干涉,全息

PACC:0760L,0790,4240

1. 引 言

近年来,由于原子冷却技术和微光学元件制造技术的成熟,使人们有希望从事原子物质波干涉和原子全息的实验研究^[1-4].1992 年 Shimizu 等^[5]用亚稳态 Ne^* 原子作为原子束源,采用微通道板记录,完成了双狭缝原子束干涉的实验研究;1996 年, Mokoto Morinaga 等^[6]做了另一个有趣的实验,他们采用计算机制作一个二元全息图,然后,用亚稳态 Ne^* 原子照明它,获得了重构像.这是迄今为止,人们在原子束全息方面的一个初步尝试.

全息术是一个两步成像过程^[7],第一步记录,以干涉条纹的形式将物体波面冻结起来,第二步是重构,可用原记录光、可见光或计算机进行.重构过程中可以设法将记录过程中引进的各种像差消除掉.从上述可以看出,真正的原子全息尚未进行过.

原子全息之所以引起人们的兴趣,是因为它有许多电子全息和中子干涉仪无可比拟的优点.

1)原子的 de Broglie 波长比电子、中子要小得多.

由 de Broglie 波长公式

$$\lambda_{dB} = \frac{h}{mv} \sqrt{\left(1 - \frac{v}{c}\right)^2}$$

可知,原子的波长与其质量 m 成反比(式中 m 为原

子质量, v 为原子速度, h 为普朗克常量, c 为光速).由于原子的质量比中子、电子大得多,因此当速度 v 一定时,原子的波长比上述两种粒子小得多,这将大大提高测试精度.

2)与电子相比,原子不受周围杂散电磁场干扰,容易提高信噪比.

3)原子束的单色亮度比中子要高,可以较为方便地实现原子束干涉测试.

正像可见光干涉一样,要实现原子物质波的干涉,首先必须对原子物质波进行分波,然后再设法使分波汇合.若各分波之间满足空间和时间相干的要求,就可形成干涉条纹.近年来常有这方面的实验报道.

我们提出一种实现原子物质波干涉的新设想.下面是这个设想的具体方法和理论估算.

2. 实验方法

实验装置如图 1 所示,它主要由 4 部分组成:原子束源、磁光冷阱、多狭缝装置和探测系统.

1)原子束源

本原子束源是采用亚稳态 $1S_3Ne^*$ 原子作束源,它可以通过以下两种方式获得:

(1)高压放电:

* 国家重点基础研究专项基金(批准号:G1999075200)资助的课题.

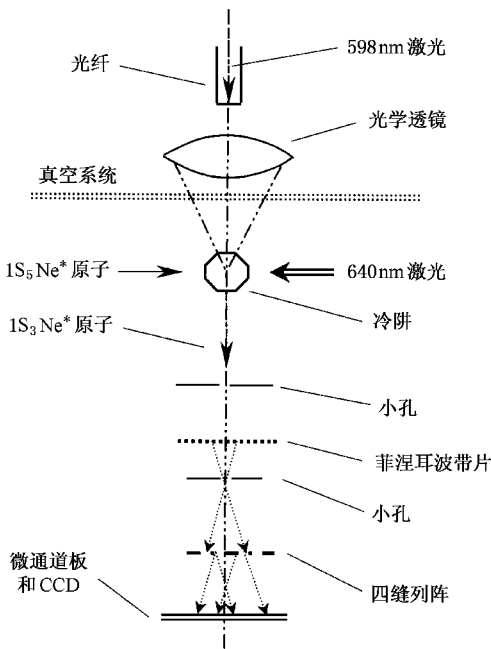
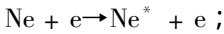
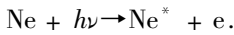


图 1 原子全息实验装置示意图



(2) 用 594nm 激光激发产生



2) 磁光冷阱

磁光冷阱由激光形成的驻波场和弱磁场组成，在光与原子相互作用过程中，借助于光与原子间线性动量共振交换，以达到控制原子外部运动自由度、降低原子动能的目的^[8]。典型的磁光冷阱，囚禁原子数目可达 10^{10} ，温度在 $10\text{--}100\mu\text{K}$ 范围内，密度可达 10^{12}cm^{-2} 。

3) 多狭缝装置

如图 2 所示，它是一个刻有四狭缝的金箔，既可以看到是一个多光束系统，也可进行无透镜傅里叶变换全息实验。

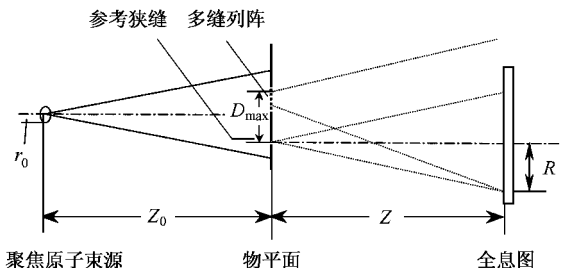


图 2 原子束多光束干涉实验装置示意图

4) 记录介质

原子束的记录不像电子束或 X 射线束那样方便——可用感光胶片或 CCD 直接记录，但可以用具有一定能量的原子束照明微通道板产生电子，再联接到 CCD 上，将干涉场记录下来。

3. 空间相干性

设原子束波长 λ 为 5nm ，源的半径 r_0 为 $4\mu\text{m}$ ，物平面上参考狭缝到最远物缝的距离 D_{max} 为 $30\mu\text{m}$ ，源到物平面的距离为 Z_0 ，见图 2。根据范西特-泽尼克定理，要使空间相干度大于或等于 0.88，上述各参量必须满足下列条件：

$$D_{\text{max}} \leq 0.16\lambda Z_0 / r_0, \tag{1}$$

得到

$$\begin{aligned} Z_0 &\geq D_{\text{max}} r_0 / 0.16\lambda \\ &= (30\mu\text{m} \times 4\mu\text{m}) / (0.16 \times 5\text{nm}) \\ &= 150\text{mm}. \end{aligned} \tag{2}$$

4. 时间相干性

参考波和物波在全息图边缘上的光程差应小于相干长度。由图 2 可知相干度应满足下列条件：

$$\begin{aligned} L_c &\geq |[Z^2 + (W/2)^2]^{1/2} - [Z^2 + (W/2 - D_{\text{max}})^2]^{1/2}| \\ &= |[Z + (W/2)^2/2Z] - [Z + (W/2 - D_{\text{max}})^2/2Z]| \\ &\approx WD_{\text{max}}/2Z \\ &= (200\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}) / (2 \times 80\text{mm}) \\ &= 37.5\text{nm}, \end{aligned} \tag{3}$$

式中 W 为衍射斑宽度，是临界相干条件，即相干长度（波列长度）只须大于等于光程差。实际上在相干长度等于光程差的条件下，干涉条纹的可见度为零。要获得可观的可见度，应使相干长度等于光程差的 2—3 倍，即

$$L_c \geq 75\text{--}112.5\text{nm}. \tag{4}$$

5. 采用波带片压缩原子束线宽并估算时间相干长度

实验中原子束的时间相干长度可以根据波长、波带片的半径和焦距以及滤波小孔半径等 4 个参量来计算。波长 λ 为 5nm ，波带片的半径 ρ 为 2.8mm ，波带片的焦距 f 为 362mm ，滤波小孔半径 r_0 为 $4\mu\text{m}$ 。相干长度可以从以下两个方面来估算：

1)如图3位于 Δf 范围内的色散光谱 $\Delta\lambda$ 可以全部通过小孔.由此可计算出相干长度的上限.

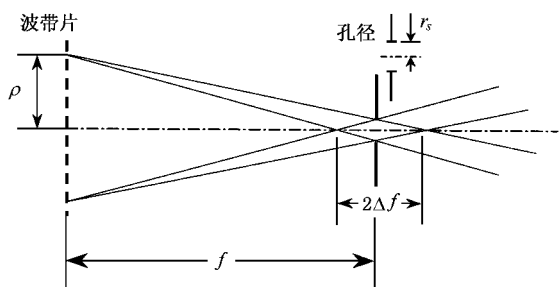


图3 波带片色散线宽示意图

$$\text{因为 } f = \rho_1^2 / \lambda, \quad \text{故 } \Delta f / f = -\Delta\lambda / \lambda, \quad (5)$$

$$\text{因为 } \Delta f / r_0 = f / \rho, \quad \text{故 } \Delta f = r_0 f / \rho, \quad (6)$$

得到

$$|\Delta\lambda| = \lambda \Delta f / f = \lambda r_0 / \rho. \quad (7)$$

考虑到焦距正的增量和负的增量,实焦距的变化范围为 Δf 的两倍.因而波长的变化范围也应为 $|\Delta\lambda|$ 的两倍.有

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_1 &= 2 |\Delta\lambda| = 2\lambda r_0 / \rho \\ &= (2 \times 5\text{nm} \times 4\mu\text{m}) / 2.8\text{mm} \\ &= 14.28 \times 10^{-3} \text{nm}, \end{aligned} \quad (8)$$

得到相干长度的上限为

$$\begin{aligned} L_{c \max} &= \lambda^2 / \Delta\lambda_1 \\ &= (5\text{nm})^2 / (14.28 \times 10^{-3} \text{nm}) \\ &= 1.75\mu\text{m}. \end{aligned} \quad (9)$$

2)透镜聚焦是折射光线的会聚,因而透镜后面只有折射光线.波带片聚焦是衍射光线的聚焦,因而波带片后面不但有衍射光线,还有透射光线(零级衍射).因此,使用波带片进行准直和滤波时必须用与焦斑尺寸相当的滤波小孔滤掉透射光.因为滤波小孔的半径 r_0 为 $4\mu\text{m}$,这意味着小孔可以让半径为 $4\mu\text{m}$ 的焦斑畅通无阻地通过.根据通过滤波小孔焦斑的半径,可以算出波带片的有效半径,从而计算出相干长度的下限.波带片的有效半径为

$$\begin{aligned} \rho_{\text{eff}} &= 0.61 f \lambda r_0 \\ &= (0.61 \times 362\text{mm} \times 5\text{nm}) / 4\mu\text{m} \\ &= 276\mu\text{m}. \end{aligned} \quad (10)$$

与(8)式同理,得到

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_2 &= 2\lambda r_0 / \rho_{\text{eff}} \\ &= (2 \times 5\text{nm} \times 4\mu\text{m}) / 276\mu\text{m} \\ &= 0.145\text{nm}, \end{aligned} \quad (11)$$

得到相干长度的下限为

$$\begin{aligned} L_{c \min} &= \lambda^2 / \Delta\lambda_2 \\ &= (5\text{nm})^2 / 0.145\text{nm} \\ &= 172\text{nm}. \end{aligned} \quad (12)$$

这个结果已经满足(4)式给出的时间相干条件.如果要继续提高原子束的时间相干性,可采取两项措施:1)缩小滤波小孔的尺寸以提高相干长度的上限;2)用半径等于波带片有效半径的光阑遮住波带片的中心部分,挡住相干性较差的原子衍射波.

6. 四缝干涉的强度分布

菲涅耳衍射条件为

$$Z^3 \gg (\pi/4\lambda) (X_0 - X_1)_{\max}^4, \quad (13)$$

夫琅禾费衍射条件为

$$Z \gg k (X_1^2)_{\max} / 2, \quad (14)$$

式中 Z 、 $(X_0 - X_1)_{\max}$ 和 $(X_1)_{\max}$ 三个参量值如下:

$$\begin{aligned} Z &= 80\text{mm}, \\ (X_0 - X_1)_{\max} &\approx W/2 = 100\mu\text{m}, \\ (X_1)_{\max} &\approx W/2 = 100\mu\text{m}, \end{aligned} \quad (15)$$

代入(13)和(14)式,分别有

$$\begin{aligned} (80\text{mm})^3 &\gg [3.14(4 \times 5\text{nm})] (100\mu\text{m})^4 = 15.7\text{mm}^3 \\ 80\text{mm} &< (2 \times 3.14/5\text{nm}) (100\mu\text{m})^2 / 2 = 6283\text{mm}. \end{aligned} \quad (16)$$

(16)式的结果说明(15)式的参量数据满足(13)式,但不满足(14)式.因此,四缝干涉可以看为四缝的菲涅耳衍射,而不能看为夫琅禾费衍射.

在参考狭缝中心建立 X - Z 坐标系,四缝可以用下式表达:

$$\begin{aligned} k(x) &= \text{rec}(x/2) + \text{rec}[(x-20)/2] \\ &\quad + \text{rec}[(x-26)/2] + \text{rec}[(x-32)/2]. \end{aligned} \quad (17)$$

干涉平面上的复振幅分布为

$$\begin{aligned} U(x_h) &= [\exp(jkz) / j\lambda z] \int_{-\infty}^{\infty} k(x) \\ &\quad \times \exp(-jk/2z) (x_h - x)^2 \text{H}x \\ &= [\exp(jkz) / j\lambda z] \int_{-\infty}^{\infty} \{ \text{rec}(x/2) \\ &\quad + \text{rec}[(x-20)/2] + \text{rec}[(x-26)/2] \\ &\quad + \text{rec}[(x-32)/2] \} \exp(-jk/2z) \\ &\quad \times (x_h - x)^2 \text{H}x. \end{aligned} \quad (18)$$

强度分布为

$$K(x_h) = U(x_h)U^*(x_h). \quad (19)$$

强度分布也可以按照全息光学中的一般方法导出. 设

$$R(X_h) = \left[\exp(jkz) \int_{-\infty}^{\infty} \text{rec}(x/2) \times \exp[-jk/2z(X_h - X)] dx \right] \quad (20)$$

为记录平面上的参考波,

$$O(X_h) = \left[\exp(jkz) \int_{-\infty}^{\infty} \{ \text{rec}[(x-20)/2] + \text{rec}[(x-26)/2] + \text{rec}[(x-32)/2] \} \times \exp[-jk/2z(X_h - X)] dx \right] \quad (21)$$

为记录平面上的物波. 复振幅分布为

$$U(X_h) = R(X_h) + O(X_h). \quad (22)$$

干涉图上的强度分布为

$$K(X_h) = [R(X_h) + O(X_h)][R^*(X_h) + O^*(X_h)] \\ = |R(X_h)|^2 + |O(X_h)|^2 \\ + R^*(X_h)O(X_h) + R(X_h)O^*(X_h). \quad (23)$$

这个干涉场可以由激发态 Ne^* 原子形成, 然后用微通道板来接收, 经 A/D 转换, 用计算机重构, 便可获得原子全息图.

本实验方法既可看作多缝干涉, 也可作为无透镜傅里叶变换全息来处理, 把单缝作为参考狭缝, 另外 3 条缝作为物, 当这 4 条缝的衍射波能交叠而相互干涉时, 产生的干涉图便是一维无透镜傅里叶变换全息图. 与双缝干涉实验相比, 它可以获得更丰富的信息, 也易于产生明显的干涉图形.

- [1] Carnal O and Mlynek J 1991 *Phys. Rev. Lett.* **66** 2689
 [2] Keith D W, Ekstrom C R, Turchette Q A and Pritchard D E 1991 *Phys. Rev. Lett.* **66** 2693
 [3] Zhou S K and Zhan M S 1993 *Chin. J. Quantum Electron.* **10**(2) 97 (in Chinese) [周士康、詹明生 1993 量子电子学 **10**(2) 97]
 [4] Cai W Q, Li C W, Huo Y S and Wang Y Z 1999 *Acta Phys. Sin.* (Overseas Edition) **8** 611
 [5] Shimizu F, Shimizu K and Takuma H 1992 *Phys. Rev. A* **46** R17

- [6] Makoto Morinaga, Masami Yasuda, Tetsuo Kishimoto *et al* 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 802
 [7] Chen J W, Zhu P P, Xu Z Z *et al* 1995 *Prog. Phys.* **15**(2) 147 (in Chinese) [陈建文、朱佩平、徐至展等 1995 物理学进展 **15**(2) 147]
 [8] Roab E L, Prentiss M, Cable A, Chu S *et al* 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 2631

A new method for building an atomic matter-wave interferometry^{*}

Gao Hong-Yi¹⁾ Chen Jian-Wen¹⁾ Xie Hong-Lan¹⁾ Chen Min¹⁾ Xiao Ti-Qiao²⁾ Zhu Pei-Ping³⁾ Xu Zhi-Zhan¹⁾

¹⁾ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

²⁾ Shanghai Institute of Nuclear Research, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

³⁾ Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

(Received 2 September 2001; revised manuscript received 30 November 2001)

Abstract

A new method for building an atomic matter-wave interferometry is proposed. In this paper, a Fresnel zone-plate is used for restricting the linewidth of atomic beams, then a quasi-monochromatic atomic beam is obtained to illuminate four slits on a copper coil. The phenomenon of atomic interference and holograph can be observed, which is used to measure the coherent length of atomic beams.

Keywords: atomic beam, interferometry, holography

PACC: 0760L, 0790, 4240

^{*} Project supported by the Special Foundation for State Major Basic Research Program of China (Grant No. G1999075200).