

## 两种不同特征的锥辐射

李彬学 杜清 林福成

(中国科学院上海光机所, 201800)

**提要:** 首次报道连续激光在金属 Na 蒸气中近共振传播时产生的两种不同特征的锥辐射的观察结果, 并讨论其产生的物理机制。

**关键词:** 锥辐射, 近共振传播

### Two different conical emissions

*Li Binxue, Du Qin, Lin Fucheng*

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

**Abstract:** We report here for the first time the experimental observations of two different conical emissions induced during the near resonant propagation of a CW laser in atomic Na vapor, and discuss the physical mechanism for their appearance.

**Key words:** conical emissions, near resonant propagation

激光束在原子蒸气中近共振传播时, 由于共振增强的非线性效应, 将引起光束特性的变化。在连续光情况下, 主要是光束的强度横向分布的变化和光谱变化。已经观察到多种引起这种变化的非线性效应, 例如连续光的自聚焦和自散焦<sup>[1]</sup>、波前编码<sup>[2, 3]</sup>, 以及角锥辐射效应<sup>[4, 5]</sup>。特别是角锥辐射效应, 近年来受到很大关注, 理论和实验研究已揭示出多种可以诱导这一效应的物理机制<sup>[4~14]</sup>。本文报道连续激光在金属 Na 蒸气中近共振传播过程中产生的两种不同特征的锥辐射现象的实验观察结果, 其独特特征, 表明为新的物理过程所诱导, 文中就此进行了分析。

图 1 是观察所采用的实验装置示意图。Ar<sup>+</sup> 离子激光泵浦环型染料激光器 (Spectra-Physics 380-D) 的输出光束经焦距  $f=115\text{ cm}$  的透镜聚焦后, 通过热管炉 (焦点在介质端面附近), 透过光的横向图样在离观察屏 2 m 远的观察屏上观察, 并以摘下镜头的照相机拍摄横向透过图样。透过光的光谱由共焦 F-P 干涉仪接收, 在示波器上显示, 用  $x-y$  记录仪记录, 入射激光功率为几十 mW, 线宽 1 MHz, 发散角约为 1 mrad; 热管炉长 50 cm, 产生约 35 cm 长的金属蒸气区。图 1 中小孔用于透射光准直, 光谱仪用来消除杂散光。

把入射光频率调谐到 Na 原子  $D_2$  线的高频侧, 在不同的激光与原子跃迁的频率偏调和不同的聚焦透镜位置上, 观察到如图 2 所示的两种不同的透过光横向强度分布图样: 第一种为空环 (a), 另一种为带中心亮点的环 (b)。

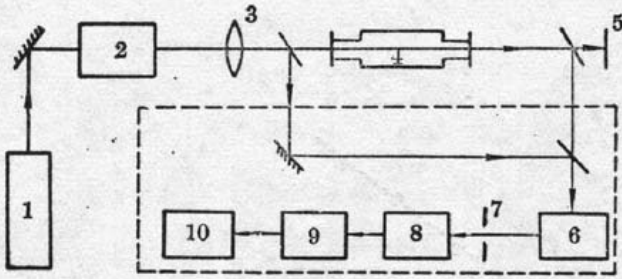


图1 实验装置图

- 1—Ar<sup>+</sup> 激光器； 2—环型染料收光器；  
 3—聚焦透镜； 4—热管炉； 5—观察屏；  
 6—光谱仪； 7—小孔； 8—F-P扫描干涉仪；  
 9—锁相放大器； 10—x-y记录仪

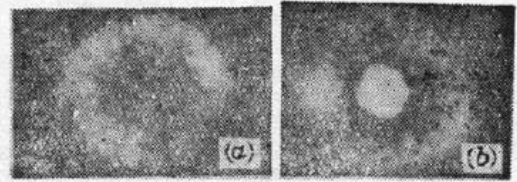


图2 两种不同的锥辐射

在频率偏调( $\Delta\nu = \omega_L - \omega_a$ ,  $\omega_L$  为激光频率)和原子密度一定时,两种环的出现均要求入射功率大于某一临界值。 $\Delta\nu$  和  $N$  相同时,出现空环比出现带中心点环要求的入射功率高。在  $\Delta\nu = 2$  GHz 和原子密度  $N \sim 5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  时,测得带中心点环出现需要入射功率大于 16 mW; 相同的偏调和密度条件下,出现空环要求入射功率大于 20 mW。入射功率保持一定时,在两种图样都能出现的条件下,空环出现时的频率偏调比带中心点环小,并且能量透过低(空环  $\sim 1\%$ ,带点环  $\sim 10\%$ )。使透镜位置保持不变,对两种环均可出现的入射功率和密度条件下,当朝共振方向调谐激光频率时,透射光横向图样发生变化,在观察屏上依次出现自聚焦亮点、带中心点亮环、空环和弱的光斑,最后完全吸收。

在 20.8 mW 的入射功率下,测量了两种环存在的频率偏调范围,当  $\Delta\nu = 2$  GHz 时,观察到空环;朝共振方向调谐 1 GHz,空环逐渐变小并演化成弱斑,从  $\Delta\nu = 2$  GHz 偏离共振调谐 450 MHz,空环变为带点环;再继续调谐 1.5 GHz,出环自聚焦亮点。此时,透镜位置和密度均保持不变;当入射功率和频率偏调一定时,将聚焦透镜朝热管炉方向移动时,在观察屏上出现与激光频率朝共振方向调谐时相同的透过光图样变化;在入射功率  $P_0 = 26 \text{ mW}$  及  $\Delta\nu = 2$  GHz 条件下,测量了两种环出现时的透镜位置变化范围,在离热管炉 100 cm 处,横向图样为弱光斑;透镜移开 6.5 cm 出现空环,再后退 10.5 cm 出现带点亮环,又移动 6 cm,则出现自聚焦亮点。还出现一种仅有带点亮环的透过光图样,频率共振方向调谐和透镜位置移动引起的透过光横向图样变化顺序为:亮点、带点环,以及弱光斑,光束的能量透过较高( $\sim 20\%$ )。

为考察两种环间的差别,测量了两种环直径随频率调谐的变化关系。结果表明,在两种环均出现的情况下,带点环的半径改变不灵敏,而空环半径很快减小并缩成弱斑后消失。测量结果如图3(a);朝热管方向移动透镜位置,结果和频率共振方向调谐类似,带点环半径变化很小,而空环半径变小,如图3(b)所示。这两种环的不同频率偏调和透镜位置变化特性,说明两者产生的物理机制是不同的。测量表明,两种环的半径对入射光功率和原子密度的改变不灵敏,测量中,入射功率最高达 45 mW,密度在  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$  至  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  之间。

这两种不同环的光谱测量结果示于图4,测量中以入射光谱为标准。发现带点环的光谱除了与入射光相同的频率成份外,无新的频率成份;而空环则含有入射光频率组份和两个边频,两边频分别位于激光频率高频侧 500 MHz 和低频侧 250 MHz 处,边频峰值接近,入射光频率调谐时,边频与其间隔保持不变。共振方向调频,按频率高低顺序依次消失;偏共振调谐,

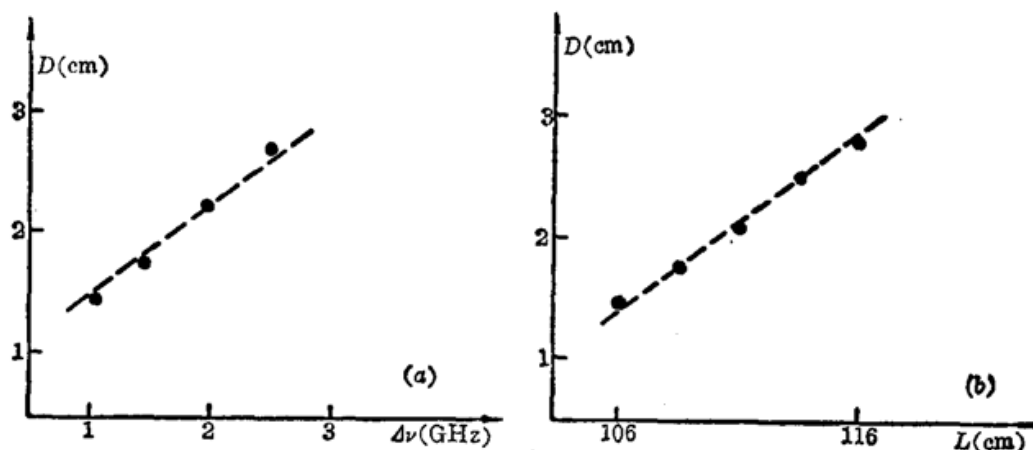


图 3

(a) 锥辐射(空环)直径和偏调量关系测量结果; (b) 锥辐射(空环)直径和透镜位置关系测量结果

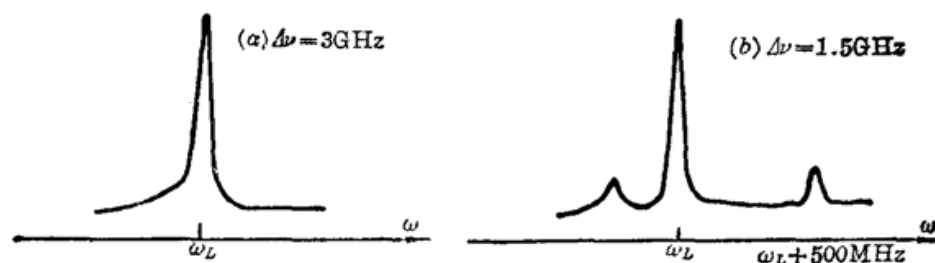


图 4 两种锥辐射的光谱

a) 带中心亮点的锥辐射光谱; b) 中空环锥辐射光谱

当中心亮点出现时,两边频分量一起消失。

这两种环光谱上的差别,进一步表明两者出自不同的物理过程。有多种机制可以产生角锥辐射:在脉冲光情况,如激光诱导瞬态共振场的四波混频<sup>[6]</sup>, Rabi 边带四波参量放大<sup>[7,8]</sup>,运动焦点相关的切伦柯夫辐射<sup>[9]</sup>,近共振受激光散射<sup>[10,11]</sup>,等;在连续光情况,已有超精细结构能级相关的非共振 Raman 散射产生的角锥辐射的报道<sup>[12]</sup>;最近 Grynberg<sup>[13]</sup>报道了一种与四波混频不稳定性振荡相关的角锥辐射。和已报道的结果相比,我们实验中观察到的两种锥辐射的性质独特,这表明出自不同的物理机制。

Grynberg 的实验中观察的角锥辐射与入射光的频率相同<sup>[13]</sup>,然而在他的实验中采用了相向传播的两束光作为泵浦光,所观察的锥辐射认为出自四波混频不稳定性相关的振荡;本文中观察到的带中心点锥辐射,虽然也与入射光同频率,但为单束连续光诱导,显然机制不同。

带点环与 A. O. Tam<sup>[12]</sup>观察的锥辐射的区别在于光谱上,那里锥辐射频率对入射光频率有一红侧移动,被归结为超精细结构能级相关的受激 Raman 散射,本实验带点环和入射光频率相同。

本文作者认为,在我们的实验条件下,锥辐射的形成与非线性极化率的饱和效应有关。在我们典型的实验条件下,入射光强和 Na 原子  $D_2$  线的饱和光强( $\sim 77\text{mW/cm}^2$ )之比约为 100,因而在传播过程中,极化饱和将起很大作用。

带点环由于相关的频率偏调较大,因而与折射率饱和效应紧密相关。可能的一种解释是,这一图样出自一种非轴向弹性散射,在这一过程中,两个轴向光子被吸收,同时产生两个轴对称的非轴向等频率光子;虽然一般情况下,这一过程因为位相匹配条件不易满足而不能发生,但在原子蒸气情形,折射率饱和效应可以使相位匹配条件在特定的 Q 方向得到满足,此时,泵浦光和信号光的饱和行为不同。这一 Q 方向相当于锥角。折射率的饱和由于较强的自聚焦效应能以维持。挡住出射光,我们观察到入射光束在热管中初始发散,然后会聚的行为。

空环情况下,入射光具有较小的频率偏调,因而吸收效应开始变得重要;实验测得,典型的空环能量远小于入射能量( $\leq 1\%$ ),相应光强更小,因此可能有高吸收介质中稳态传播的特征;M. LeBerre<sup>[2]</sup>在处理二能级高吸收介质中连续光的稳态传播时,提出波前编码理论模型:在传播的第一过程中,入射光束无衍射地经受非线性吸收(编码过程),这一过程后,光束相当于处于自由空间进行自由衍射。根据这一模型, M. LeBerre 预言稳态传播中各种横向分布图样,如自聚焦、自散焦和环。这一理论已得到实验支持<sup>[3]</sup>。

我们在实验中观察到的空环图样,由于透过光弱,因此可以视为一种编码图样。所不同的是编码过程比以上的模型要复杂得多。其一,实验中,入射光是发散的,因而衍射就不可忽略;其次,极化率实部分量有重要影响(自聚焦)。故编码过程可能是多种效应的合作结果,光谱上的边频说明了这一点。

聚焦光束的极化率与焦点位置、焦长有关,透镜的移动会引起极化率的变化,从而导致横向图样的变化;这种变化,对于较小的共焦参数,由于透镜位置变化引起的极化率改变就越明显。在我们的条件下,共焦参数约为 10 cm,这样,在 20 cm 透镜移动范围内,将明显改变极化率,而且这种改变,与光强改变导致的极化改变是不同的,后者导致极化饱和程度的变化。

上述物理解释,有待进一步的实验和理论分析计算。

作者衷心感谢李世芳、瞿佳男、景春阳等同志在实验中给予的热情协助。

## 参 考 文 献

- 1 J. E. Bjorkholm *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **32**, 129 (1974)
- 2 M. LeBerre, *Phys. Rev.* **A25**, 1604(1982)
- 3 M. Leberre, *Coherence & Quantum Optics*, ed by L. Mandel and G. Wolf, New York, 1985, 345.
- 4 Y. H. Meyer *et al.*, *Opt. Commun.*, **34**, 439(1980)
- 5 G. Brechigne *et al.*, *Opt. Commun.*, **35**, 87(1980)
- 6 G. H. Skinner *et al.* *Phys. Rev.*, **A21**, 151(1980)
- 7 D. J. Harter *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **46**, 1192(1981)
- 8 D. J. Harter *et al.*, *Phys. Rev.*, **A29**, 739(1984)
- 9 I. Golub, *J. Phys.*, **B19**, L115(1986)
- 10 Y. Shevy *et al.*, *Opt. Lett.*, **11**, 85(1986)
- 11 Y. Shevy *et al.*, *Opt. Lett.*, **13**, 215(1988)
- 12 A. G. Tam, *Phys. Rev.*, **A19**, 1971(1979)
- 13 G. Grynberg, J. Paye, *Eleventh International Conference on Atomic Physics, Paris, 1988, July, 4~8.*
- 14 A. L. Plehanov *et al.*, *Sov. Phys., JETP*, **61**, 249(1985).