

# 利用光抽运效应观察原子束的慢波微波谱\*

李佛生 蔡惟泉 王育竹

(中国科学院上海光机所量子光学开放实验室 上海 201800)

**提要** 报道了利用光抽运方法在慢波场中观察原子束的微波吸收谱。给出了钠原子束在慢波系数分别为 5.20 和 10.67 时螺旋线慢波结构中原子束的驻波微波谱。实验观察到了在原子束慢波微波谱的多普勒频移随慢波系数的变化,并讨论了慢波场的偏振对波谱的影响。观察了螺旋线慢波结构轴与原子束垂直放置时波谱中谱线的增宽,并进行了讨论。

**关键词** 慢波,波谱,微波

慢波是一种相速慢于光速的电磁波,它是一项与微波通讯相关的技术,已经过了多年的研究,形成了较为成熟的理论。但对于慢波和原子的相互作用的研究却没见到更多的报道。慢波由于波速的变化,引起多普勒频移的变化;其横向场分布也与通常的场不同,因此它的吸收谱也有自己的特点。

## 1 实验原理

当运动原子与普通电磁波作用时,由于多普勒效应影响,原子的共振吸收条件由  $\omega = \omega_0$  变为

$$\omega = \omega_0 + \vec{k}_0 \cdot \vec{v} \quad (1)$$

式中  $\omega$  为电磁波频率,  $\omega_0$  为原子固有频率,  $\vec{k}_0$  为电磁波的波矢,  $\vec{v}$  为运动原子的速度。

我们采用螺旋线慢波结构。考虑一个用导线绕制的螺旋线,电磁波沿导线以光速  $c$  前进,而沿螺旋线轴向的电磁波速度<sup>[1~4]</sup> 约为

$$v_s = c \cdot \frac{d}{\sqrt{d^2 + (2\pi a)^2}} \quad (2)$$

式中  $d$  为螺线管的螺距,  $a$  为其半径;因电磁波的频率  $\omega$  不变,则电磁波沿螺线管慢波结构轴向的波长变为  $\lambda = 2\pi v_s / \omega$ , 小于原有波长。由于电磁波的波矢  $\vec{k}$  反比于波长,在慢波中有  $\vec{k} = S \vec{k}_0$ 。其中  $S = \sqrt{d^2 + (2\pi a)^2} / d$  为慢波因子。比较(1)式可知,在慢波中运动的原子的共振频率为

$$\omega = \omega_0 + \vec{k} \cdot \vec{v} = \omega_0 + S \vec{k}_0 \cdot \vec{v} \quad (3)$$

在一个热原子束中,原子速度按麦克斯韦分布<sup>[5]</sup>。在  $(v, v + dv)$  速度间隔内的原子束的分

\* 国家自然科学基金(编号:19392503)和中国科学院量子光学开放实验室资助项目。

收稿日期:1998-07-22;收到修改稿日期:1998-08-12

束强为<sup>[5]</sup>

$$\frac{dI'}{dv} = I_0' \frac{v^3}{\alpha^3} \exp\left[-\frac{v^2}{\alpha^2}\right] \quad (4)$$

其中  $\alpha = \sqrt{2k_B T/m}$ ,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为束源温度,  $m$  为原子质量,  $I_0'$  为原子束的总束强。考虑原子束与螺旋线慢波结构同轴且慢波传播方向与原子束反向, 将式(4) 代入(3), 可得原子束吸收强度随频率变化为

$$I(\omega) = I_0 \frac{(\omega_0 - \omega)^3}{S^4 k_0^4 \alpha^3} \exp\left[-\frac{(\omega_0 - \omega)^2}{S^2 k_0^2 \alpha^2}\right] \quad (5)$$

实验中采用光抽运技术。用与钠的  $3P_{3/2}$  和  $3S_{1/2}$ ,  $F = 2$  能级间跃迁共振的激光照射原子束, 使处于  $3S_{1/2}$ ,  $F = 2$  态原子跃迁至  $3P_{3/2}$  能级, 然后经自发辐射回到  $3S_{1/2}$  态, 这个过程中有一定数量的原子被抽运至  $3S_{1/2}$ ,  $F = 1$  态, 经若干个跃迁和自发辐射的循环过程后,  $3S_{1/2}$ ,  $F = 2$  态可全部被抽空, 原子样品就被制备到  $3S_{1/2}$ ,  $F = 1$  能级上。接着原子束进入的慢波结构与微波作用, 随着微波频率的变化, 原子束吸收微波强弱也随之变化, 使一些原子从  $3S_{1/2}$ ,  $F = 1$  态跃迁至  $3S_{1/2}$ ,  $F = 2$  态, 吸收强度越大, 处于  $3S_{1/2}$ ,  $F = 2$  态的粒子数也越多。然后用与抽运光同频率的探测激光照射, 使处于  $3S_{1/2}$ ,  $F = 2$  态的原子再次激发至  $3P_{3/2}$  态, 并再次自发地辐射跃迁, 同时发出荧光。通过观察荧光强度随频率的变化, 就可得到原子束和微波作用后处于  $3P_{3/2}$  态粒子数随频率的变化, 即原子束对微波的吸收谱。

## 2 实验装置和结果分析

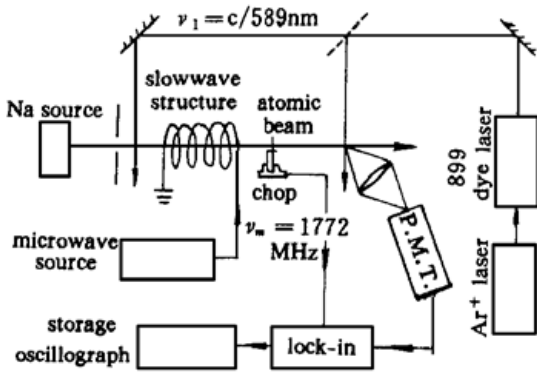


图1 实验装置

Fig.1 Experimental setup

图1是实验装置。钠原子从钠炉出发, 飞行1 m左右经小孔准直, 然后经大光强的抽运激光束照射后进入慢波结构与微波作用, 再飞行约0.5 m后被斩波器调制, 接着经过约0.3 m距离后, 受同频率的弱探测激光束照射, 原子束发出的荧光经透镜收集, 由光电倍增管接收, 输出信号经锁相放大器放大进入存储示波器(HITACHI VC-6523) 观察和记录。微波频率在1769~1774 MHz范围内扫频, 记录下荧光信号强度随频率的变化, 就得到该波段的微波吸收波谱。

所用的抽运和探测激光波长为589 nm, 来自一台使用Rh6G染料的899染料激光器, 与钠的  $3P_{3/2}$  能级至  $3S_{1/2}$ ,  $F = 2$  能级的跃迁共振。钠源温度设定为300℃。锁相放大器时间常数取为300 ms, 灵敏度为3 mV。

在  $S = 5.20$  和  $10.67$  的螺旋线的慢波结构(半径约为4~5 mm, 螺距为2~5 mm, 长度为2~3 cm)上, 分别得到了图2所示的波谱曲线(a)和(b)。这两条谱线结构大致相同, 都有高低相间的由钠原子的磁子能级间跃迁引起的七组双峰。两组谱线不同之处是(a)的峰比(b)的峰宽度大了约一倍左右。

对于钠原子的  $3S_{1/2}$  态,  $F = 2$  超精细能级共有  $M_F = 0, \pm 1, \pm 2$  五个磁子能级, 对于  $3S_{1/2}$  态,  $F = 1$  超精细能级共有  $M_F = 0, \pm 1$  三个磁子能级。根据跃迁选择定则<sup>[6]</sup> 共有九种跃迁。根据文献[6]所提供的计算方法, 在表1中给出了所有这些跃迁细节。其中3与4, 6与7跃迁频

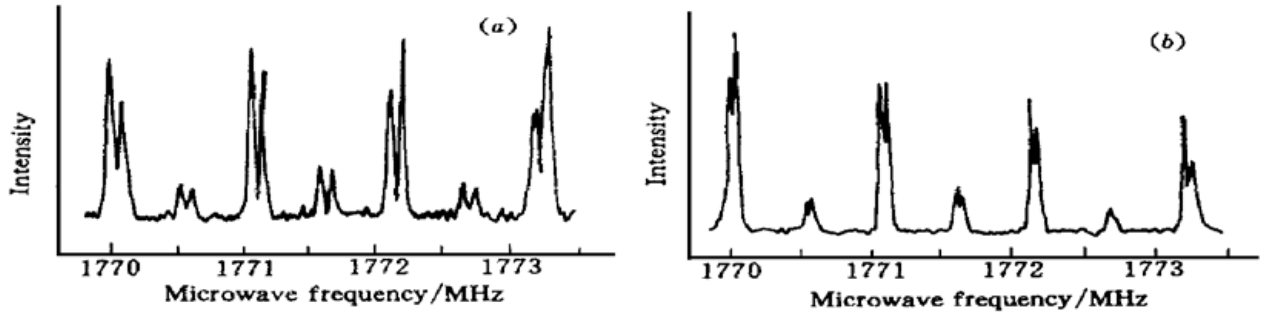


图 2 两种不同慢波系数下原子束的微波吸收谱

Fig. 2 Absorption spectra of an atomic beam in two different slow-wave fields

(a)  $S = 10.67$ ; (b)  $S = 5.20$

率相同, 吸收线重叠。因此在吸收波谱中只能看见七组峰。峰的高度及跃迁几率与地磁场的方向有关(见参考文献[7, 8])。

表 1 钠原子基态  $F = 1 \rightarrow F' = 2$  的所有可能的磁子能级间的跃迁情况

Table 1 The possible transitions between the sub-levels of Na groundstates  $F = 1 \rightarrow F' = 2$

No.	$m_F$	$m_{F'}$	$\Delta m_F$	Polarization of excite fields	$\Delta v_m$	Possibility of transitions
1	1	2	1	right	$1.5\mu_B H/h$	3/4
2	1	1	0	line ( $z$ -axis)	$\mu_B H/h$	3/16
3	1	0	-1	left	$0.5\mu_B H/h$	1/8
4	0	1	1	right	$0.5\mu_B H/h$	3/8
5	0	0	0	line ( $z$ -axis)	0	1/4
6	0	-1	-1	left	$-0.5\mu_B H/h$	3/8
7	-1	0	1	right	$-0.5\mu_B H/h$	1/8
8	-1	-1	0	line ( $z$ -axis)	$-\mu_B H/h$	3/16
9	-1	-2	-1	left	$-1.5\mu_B H/h$	3/4

慢波谱中的双峰结构是由驻波场的多普勒效应引起的。驻波场由两个行波场构成, 用(5)式对图 2 (a) 和 (b) 两组谱线中的 0-0 跃迁(表 1 中的跃迁 5), 即中间的峰, 进行数值拟合, 得到了图 3 中的两条谱线 (a) 和 (b)。拟合得到的慢波系数的数值  $S_a = 8.9$  和  $S_b = 4.1$ , 略小于计算值, 但证实了多普勒频移随着慢波系数同时增大或减小。误差的主要来源是忽略了导线的尺寸、粗细和长度。计算某些模型<sup>[1, 2, 4]</sup> 给出螺旋线慢波结构的慢波系数应有  $1 < S < 1/\sin\psi$ , 其中  $\sin\psi$  为螺旋线的螺距角。

图 2 (a) 和 (b) 的另一个明显特征是: 以 0-0 跃迁频率为谱线的中心高频端和低频端具有一定的对称性。(a) 中四组吸收幅度较大的双峰都是边上那个峰较高, 中间的较低。最靠边上的两组峰这种趋势特别明显。而 (b) 除从低频段数起的第三组峰因反射波幅度较小使这种对称有所破坏外, 总的趋势是外低里高。产生这种情况的原因是微波场的入射波和反射波都沿螺旋线前进, 它们偏振的旋转是反向的。通过一些螺旋线结构模型中场的计算可知偏振与  $\phi$  和  $r$  都有关, 其中  $\phi$  和  $r$  是柱坐标的方向角和矢径。从表 1 可以得到三组较低的峰是  $\pi$  跃迁, 与场偏振的旋转无关, 反射和入射波产生的谱线的吸收峰, 只与场的强度有关。(a) 中低频端的第一组峰由于入射波左旋成分较多, 该跃迁正好由左旋场激发( $\sigma^-$  跃迁), 所以峰较高; 反射波右旋

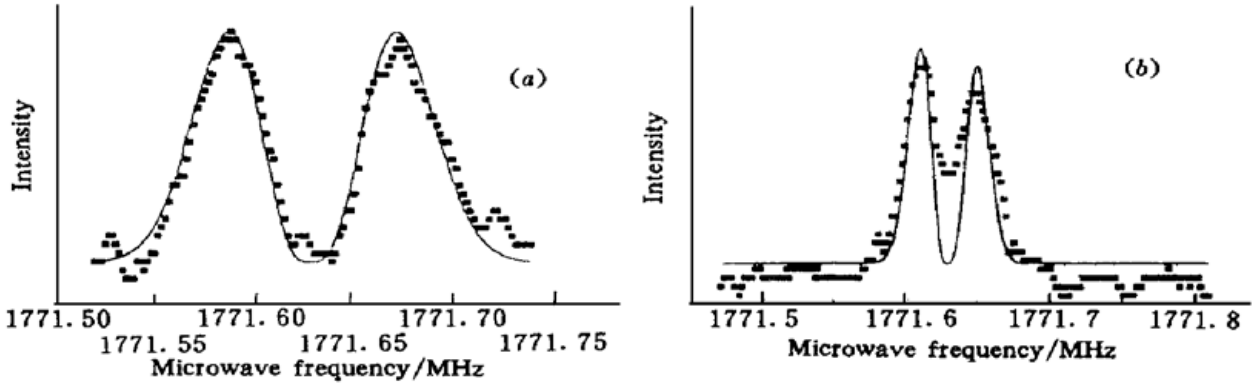


图 3 对图 2 曲线中 0-0 跃迁拟合求得 (a)  $S = 8.9$ , (b)  $S = 4.1$

Fig. 3 Fitting curves for 0-0 transition lines in Fig. 2 results are (a)  $S = 8.9$ , (b)  $S = 4.1$

成分较多,吸收峰也就较低。高频端( $\sigma^+$ 跃迁)的情况正好相反。而对于(b)图,入射波的右旋成分较多,因此发生了相反的情况。而低频端的第三组峰有两个分别为 $\sigma^-$ 和 $\sigma^+$ 的跃迁同时参与,但两跃迁的跃迁几率不同,因此场的偏振对吸收谱的影响还可看得见,但情况不如第一组峰那么明显。高频端的情况也可作类似的分析。

为了验证慢波谱的双峰结构是由驻波造成的,我们把一个半径为 1 cm,慢波系数为 10.67 的螺旋线慢波结构的轴向与原子束垂直放置,得到的谱见图 4。与通常行波谱不同,每条谱线不是产生一个很尖锐的峰,而是出现了一个分布较宽的峰。分析其原因应从场的横向分布着手。螺旋线慢波结构产生的场在柱坐标下横向分布的解(主模),在  $r < a$  时,分别正比于变形贝塞尔函数  $I_0(\tau)$  ( $z$  方向) 和  $I_1(\tau)$  ( $\phi$  和  $r$  分量);而在  $r > a$  时,分别正比于变形贝塞尔函数  $K_0(\tau)$  ( $z$  方向) 和  $K_1(\tau)$  ( $\phi$  和  $r$  分量),其中  $a$  为螺旋线结构的横向半径,  $\tau = k_0 \sqrt{s^2 - 1}$ 。利用傅里叶积分,场的形式可变为

$$E(r, z, t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(k) \cdot \exp(ikr) dk \cdot \exp[i(\omega t - Sk_0z)] \quad (6)$$

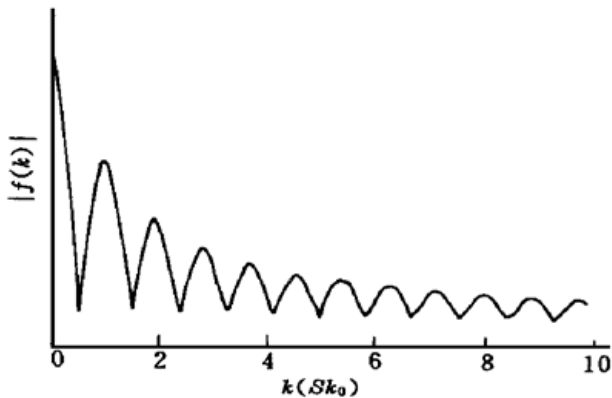


图 4 慢波结构与原子束轴线垂直情况下,原子束的微波吸收谱

Fig. 4 Spectrum obtained when the slow-wave structure is perpendicular to the atomic beam

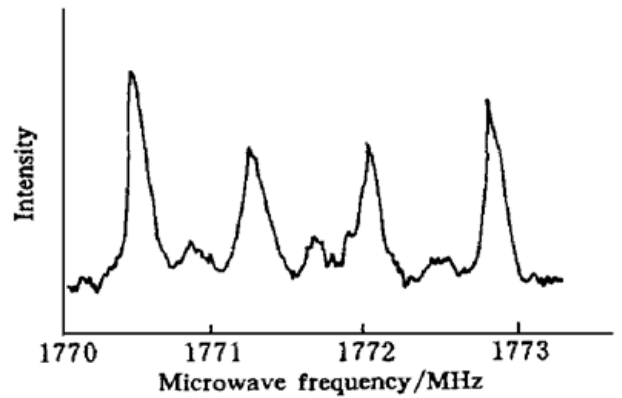


图 5 慢波结构中场的  $z$  分量之傅里叶分量沿  $r$  方向的分布曲线

Fig. 5 Coefficient of the Fourier integral for the field distribution of  $z$  component along  $r$ -axis in a slow-wave structure varies with  $k$

图 5 为场的  $z$  分量傅里叶变换式  $f(k)$  随  $k$  变化,这里因  $f(k)$  以  $k = 0$  对称,所以仅给出了  $k > 0$  的部分。同样也可将场的  $\phi$  和  $r$  两个分量这样展开。所得的波谱是所有这些展开傅里叶分

量共同作用的结果。在  $k = 0$  附近  $f(k)$  的值较大, 而且这些分量多普勒频移很小, 所有原子可在同一频率与这些分量作用, 因此谱线在原子共振频率处出现了类似普通行波作用的较为尖锐的峰, 边缘是  $k$  的其他分量产生的背景。产生背景的那些  $k$  分量, 幅度较小, 加之随着  $k$  的增大多普勒峰将变得非常扁平, 因此产生了较低背景。所有  $k$  的分量作用的叠加就形成了观察到的谱线形式。

原子束在慢波微波吸收中多普勒频移的增大是一个新观察到的现象, 慢波场的原子束微波谱的研究也刚刚开始, 实验现象和有关的物理问题有待进一步深入研究。

### 参 考 文 献

- 1 Liu Shengguang, Li Hongfu, Wang Wenxiang *et al.*. Introduction to Microwave Electronics. Beijing: Publish House of National Defence Industry, 1985. 161~ 185 (in Chinese)
- 2 Zhang Keqian, Li Dejie. Electromagnetic Theory in Microwaves and Optoelectronics. Beijing: Publish House of Electronic Industry, 1994. 397~ 441 (in Chinese)
- 3 J. C. Walling. Interdigital and other slow-wave structure. *Journal of Electronics and Control*, 1957, **3**: 239~ 258
- 4 R. M. Bevensee. Electromagnetic Slow Wave Systems. New York, London, Sydney: John Wiley & Sons, Inc, 1964
- 5 L. Valyi. Atom and Ion Sources. New York, London, Sydney: John Wiley & Sons, Inc, 1977. 96~ 97
- 6 Wang Yiqiu, Wang Qingji, Fu Jishi *et al.*. The Principle of Quantum Frequency Standards. Beijing: Science Press, 1986. 74~ 76, 178~ 180 (in Chinese)
- 7 Li Fusheng, Cai Weiquan, Wang Yuzhu. Observation of Doppler shift of a atomic beam in slow-wave field. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(10): 1286~ 1289 (in Chinese)
- 8 Cai Weiquan, Li Fusheng, Wang Yuzhu. Microwave spectra of atomic beam in slow-wave structure. *Laser Spectroscopy*, ed. Z. J. Wang, Z. M. Zhang, Y. Z. Wang, Hangzhou, 1997. 65

## Observation of Spectra on an Atomic Beam in a Slow-microwave Field Using the Optical Pumping

Li Fusheng Cai Weiquan Wang Yuzhu

(Joint Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and  
Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** This paper reports the observation of a spectrum on an atomic beam in slow-microwave fields using the optical pumping. The spectrum is given in standing microwave fields when the slow-wave factors of helix structures are 5.20 and 10.67 respectively. Doppler shift varying with the slow-wave factor is observed experimentally, and the influence of the field polarization on the spectrum is discussed. The broadening of the spectral line in the spectrum when the helix structure is perpendicular to the atomic beam is also observed and discussed.

**Key words** slow-wave, spectrum, microwave