

高对比度透射光谱中碰撞增强的 Hanle 共振*

张炳龙 邹英华
(北京大学 物理系)

提 要

在高对比度透射光谱中观察到线宽 18 mG (FWHM) 钠原子基态中碰撞增强的 Hanle 共振。此共振的线宽仍表现出 Dicke 变窄效应, 但信号的强度却随着缓冲气体压强急剧地增加。
关键词: 碰撞增强的共振; 高对比度透射光谱。

一、引 言

碰撞增强的 Hanle 共振曾经在下列不同的光学过程中得到研究: 四波混频^[1,2], 荧光光谱^[3], 光场感生双折射^[4,5], 非线性吸收光谱^[6] 和自作用效应^[7,8]。在非线性吸收光谱中的 Hanle 共振显示为经过光学薄钠原子蒸汽的透射光强在零磁场下尖锐的增强。Svanberg 等人^[9] 已经证实: 在光学厚的原子样品中可以观察到高对比度和亚自然线宽的饱和吸收讯号。本文报道如何将此方法应用于碰撞增强的 Hanle 共振的研究。

二、基本 原理

在文献[6]所介绍的工作中, 来自同一单模连续染料激光器的两束抽运光 (ω, \mathbf{K}_1) 和 (ω, \mathbf{K}_2) 大体上沿 \hat{x} 方向传播。光束 (ω, \mathbf{K}_1) 线偏振于 \hat{y} 方向, 而光束 (ω, \mathbf{K}_2) 的偏振方向是 \hat{z} 方向。这两束光经聚焦后以小角度 θ 相交于钠热管炉的中央。光束之一经机械斩波器调制, 而另一束用一锁定放大器同步探测。Hanle 共振是通过扫描 \hat{z} 方向磁场 (B) 来记录的。

作为钠原子基态 ($3^2S_{1/2}$) 磁子能级 $|g\rangle$ 和 $|g'\rangle$ 之间碰撞增强的 Zeeman 相干性的一个结果, 在低光强条件下光学薄钠原子蒸汽吸收的减小可表示为^[6]:

$$\Delta I \propto \frac{N |\mu|^4 |E|^4 \Gamma_{gg'}}{4\hbar^4 \{ [\hbar^{-1} g\beta B + (\mathbf{K}_1 - \mathbf{K}_2) \cdot \langle \mathbf{v}_{th} \rangle + \Gamma_{gg'}^2] + \Gamma^2 \} (\Delta^2 + \Gamma^2)^2} \cdot \Gamma^2 \quad (1)$$

式中 N 是钠原子 $3^2S_{1/2}$ 态的布居数、 $\Gamma_{gg'}$ 是磁子能级间的阻尼常数、 Δ 为相对于钠原子 D_1 共振线的调偏, 而 Γ 是 D_1 线的阻尼常数,

$$\Gamma = \frac{1}{2} t_{sp}^{-1} + C_0 P$$

(t_{sp} 为钠原子 $3^2P_{1/2}$ 态的自发辐射寿命, P 为缓冲气体压强, C_0 为碰撞展宽系数)。方程(1)可以由碰撞增强的 Zeeman 相干性或者碰撞协助的横向光抽运理论推出, 并且已经由实验验证^[1,6]。含包了剩余的 Doppler 增宽 $(\mathbf{K}_1 - \mathbf{K}_2) \cdot \langle \mathbf{v}_{th} \rangle$ 的线宽的测量显示出 Dicke 变窄效应, 即在一定气压范围内线宽反比于缓冲气体压强。Hanle 共振的峰值强度随调偏量 Δ 以 Δ^{-4} 而变化, 并正比于缓冲气体压强的平方 (P^2)^[6]。

方程(1)只适用于弱横向光抽运, 对于强的横向光抽运情形^[2], 必须考虑功率加宽 (FWHM):

$$\Delta w_{\text{power}} = \frac{2\Omega^2 \Gamma}{\Delta^2 + \Gamma^2} \quad (2)$$

这一功率加宽可以解释为能级 $|g\rangle$ 和 $|g'\rangle$ 上原子寿命的缩短, 这种缩短是从它们光抽运出去的速率决定的。在方程(2)中 Ω 为 Rabi 频率, 可表示为:

$$\Omega = \frac{\mu E}{2\hbar}$$

于是, 功率加宽 Δw_{power} 应正比于激光的强度。在光学薄的钠蒸汽实验中已经证实^[2]: 在强光抽运情形 Hanle 共振的峰值强度趋于一个不变值, 而不再依赖于缓冲气体压强、激光强度和调偏量。同时, 由于 $\Gamma_{gg'} \ll \Gamma$, 光学激发态 ($3^2P_{1/2}$) 的布居仍可忽略不计。

追随 Svanberg 等人^[9]的工作, 我们研究了光学厚的钠蒸汽的碰撞协助的横向光抽运。根据方程(2)的内含, 强光抽运将是以下情况的结果: 高激光光强, 高缓冲气体压强和小调偏量。在高缓冲气体压强范围内, 剩余 Doppler 增宽应该是很小的, 按照方程(1)和(2), 微分光吸收可表示如下:

$$dI = -Id(\alpha x) + \frac{\beta/C^2}{B^2/C^2 + \left(1 + \frac{D}{C} I\right)^2} I^2 d(\alpha x) \quad (3)$$

右边第一项与线性吸收有关, 而第二项表示非线性吸收, 这种非线性吸收来源于碰撞协助的横向光抽运。这儿, β 是一常数, 而 B 表示 \hat{z} 向磁场。碰撞增强的 Hanle 共振的线宽包含两部分贡献: 功率加宽 DI 和“极限线宽” C 。 C 表示在光学薄蒸汽中可能获得的最小线宽, 已经证明^[2] 它应包含剩余 Doppler 增宽、自旋变化碰撞、剩余磁场不均匀性和自旋交换碰撞等贡献。

方程(3)的数值积分, 可以给出作为磁场 B 的函数的相对透射光强, 而这正是光学厚蒸汽中碰撞增强的 Hanle 共振。

三、结果与讨论

图 1 表示讯号相对于背景之比(定义为 $\frac{I(L)|_{B=0}}{I(L)|_{B \gg 0}}$)的对数值如何随着吸收长度 αL 而变化的情形。在光学厚蒸汽中的 Hanle 共振, 以(背景光本质上是零)透射光的增加的形式表现出来。大家都知道, 透射光谱的探测噪音是正比于背景光强的。由此可见在光学厚的蒸汽中可以获得信噪比更好的 Hanle 共振。

图 2 表示碰撞增强的 Hanle 共振的线型是如何随着吸收长度的增加而变化的。正如预期的那样, 光学薄蒸汽 ($\alpha L \sim 0.1$) 对应的曲线表现为包含率加宽的洛伦茨线型。而与此相对

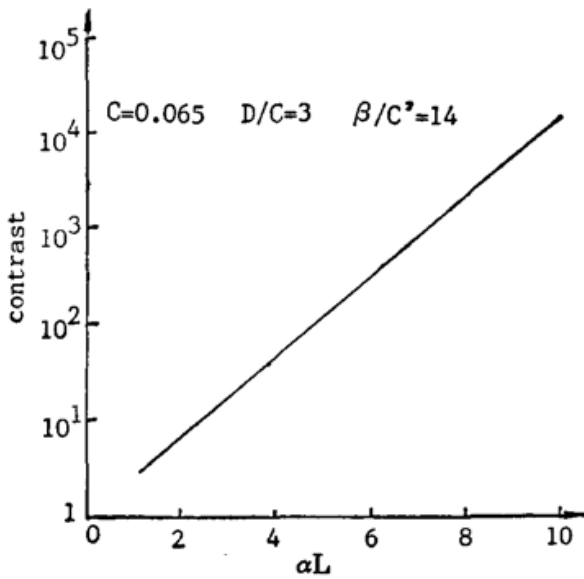


Fig. 1 Theoretical values of the contrast as the function of absorption length

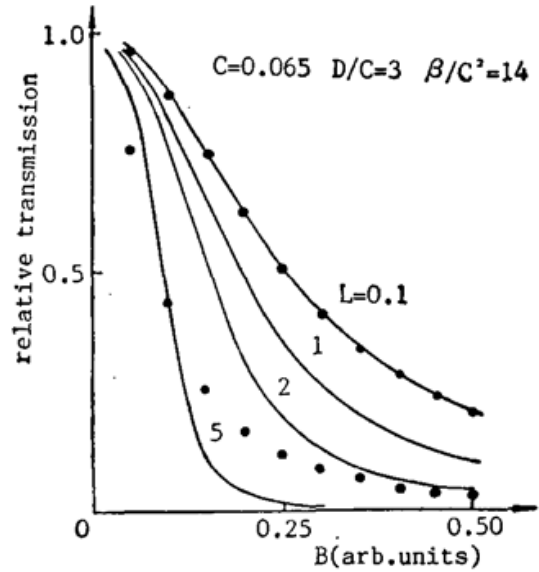


Fig. 2 Theoretical lineshapes of Hanle signal ($I(L)|_B - I(L)|_{B \gg 0}$) for different absorption lengths αL . All curves are normalized to 1 at zero magnetic field. The dots represent the Lorentzian fit.

照, 在高 αL 值下显示出对于洛伦茨线型的明显偏离。十分有趣的是我们注意到对于更加厚的蒸汽, 线宽表现出持续的变窄。这一重要的特性可以归结为: 在 Beer-Lambert 指数吸收律下 Hanle 共振的占优势的两翼吸收。这一变窄效应, 如图 2 所示, 不仅表示出相对于功率加宽、而且相对于其它加宽因素处于支配地位。因而, 在更加稠密的蒸汽中可以得到比“极限线宽” C 更窄的线型。图 3 表明 αL 的临界值大约是 15, αL 值高于 15 时线宽将比 C 更窄。类似的计算证明, 这一临界值将随抽运光强的增加而减小。

以上所有理论预言都在钠蒸汽的实验中得到了验证。实验安排与原先报道的光学薄蒸汽的实验^[6]类似, 但是我们采用了更高的蒸汽温度以增加吸收长度, 而且高对比度的碰撞增强的 Hanle 共振是在高抽运光强或小调偏量下得到观察。

图 4 表示的两条线型是在不同炉温下记录到的。在 218°C (N 大约为 $7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) 时, 具有 210 mG (FWHM) 宽度的 Lorentzian 线型表明了光学薄蒸汽中碰撞增强的 Hanle 共振的特征。而在 308°C ($N \sim 3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) 记录到信噪比更好的大为变窄 (18 mG) 的谱线。这一线型与图 2 中稠密蒸汽的理论曲线相一致。值得指出的是 18 mG 线宽已经比在光学薄介质^[1]中记录到的最小线宽还要窄。如此窄的 Hanle 共振也再一次证实了在稠密碱金属蒸汽中自旋交换碰撞只对基态 Hanle 共振线宽给出非常小的贡献^[10]。

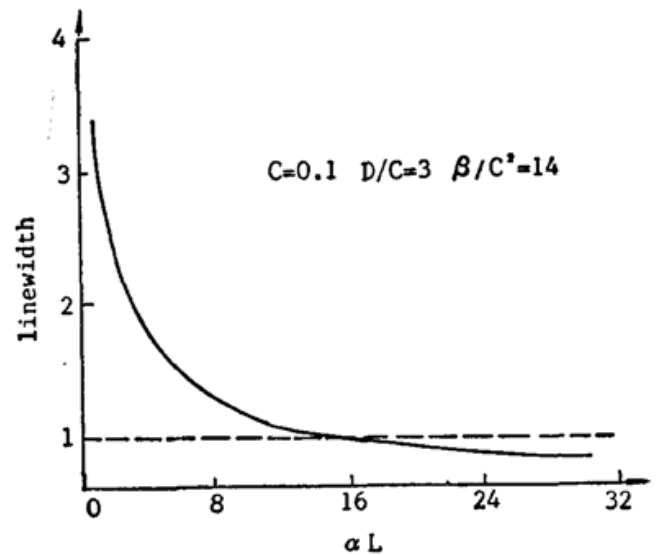


Fig. 3 The relative linewidth of Hanle resonance with absorption length αL . The dashed line shows the “limit linewidth” (see text)

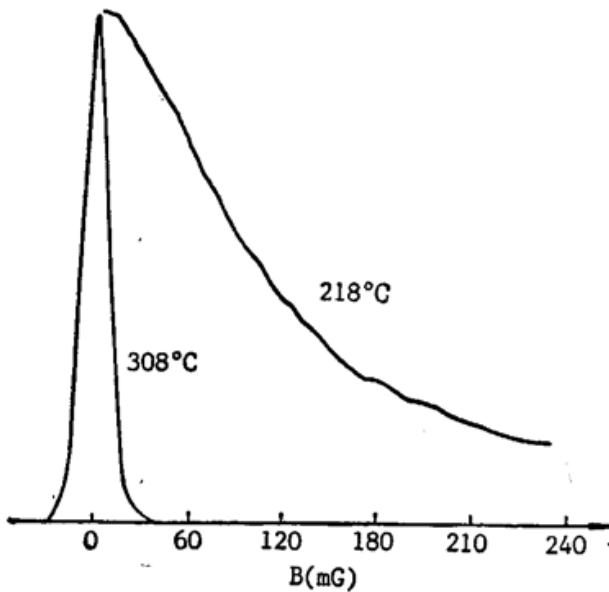


Fig. 4 Experimental lineshapes of Hanle resonance for different Na Vapor temperature ($\theta=0.6^\circ$, $P_{N_2}=1770$ Torr; $\Delta=20$ GHz below D_1 resonance; $I=0.4$ W/cm² in each incident beam)

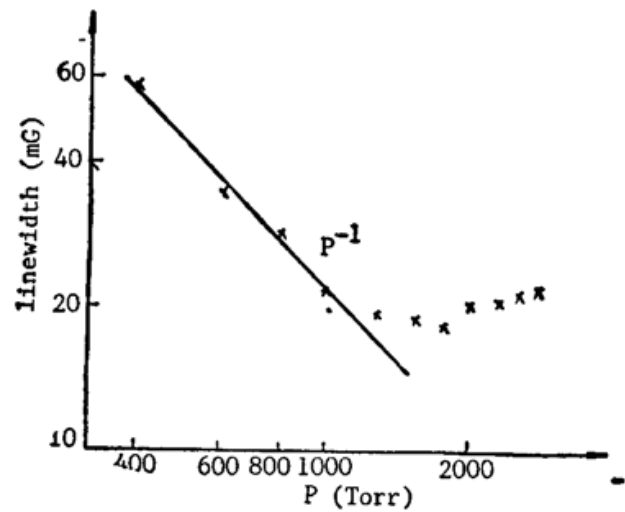


Fig. 5 Double logarithmic plot of the FWHM width of the high contrast-collision-enhanced Hanle resonance versus N₂ buffer gas pressure. ($\theta=0.6^\circ$, $T_c=315^\circ$ C, $\Delta=20$ GHz below D_1 resonance, $I=0.4$ W/cm²)

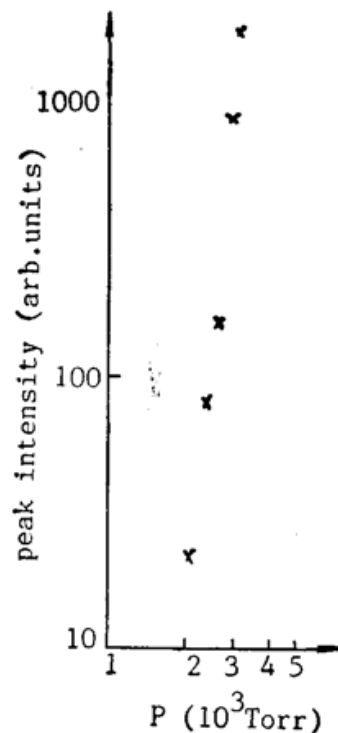


Fig. 6 Peak intensity of high contrast collision-enhanced Hanle resonance versus N₂ pressure. (same with Fig. 5)

我们研究了这一高对比度碰撞增强 Hanle 共振的线宽和强度作用缓冲气体压强的函数关系。图 5 表示, 当缓冲气体压强低于 1000 Torr 时, 变窄了的 Hanle 共振仍表现出 Dicke 变窄效应。在高缓冲气体压强下, 显示出剩余的功率加宽的存在。另一方面, 信号强度的赖依关系却与光学薄蒸汽中的完全不同。图 6 表示出一种急剧的增涨, 而这种情形只在

强的横向光抽运稠密蒸汽情形下才观察到。

凌志弘同学曾参加一部分数值计算,作者深表谢意。

参 考 文 献

- [1] N. Bloembergen *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **54**, No. 3 (Jan), 186~188.
Y. H. Zou and N. Bloembergen; *Phys. Rev.*, 1986, **A33**, No. 3 (Mar), 1730~1743.
- [2] R. Scholz *et al.*; *Appl. Phys.*, 1983, **B28**, No. 2 (Jun), 191~192.
- [3] W. Lange; *Opt. Commun.*, 1986, **59**, No. 3 (Sep), 243~248.
- [4] M. Pinard *et al.*; *Phys. Rev.*, 1987, **A35**, No. 7 (Apr), 2951~2956.
- [5] Q. H. Gong and Y. H. Zou; *Opt. Commun.*, 1988, **66**, No. 5/6 (May), 294~298.
- [6] Q. H. Gong and Y. H. Zou; *Opt. Commun.*, 1988, **65**, No. 1 (Jan), 52~56.
- [7] G. Grynberg and P. Verkerk; *Opt. Commun.*, 1987, **1**, No. 4 (Feb), 296~298.
- [8] Q. H. Gong *et al.*; *Chinese Physics Letters*, 1999, **5**, No. 10 (Oct), 441~444.
- [9] S. Svanberg *et al.*; *J. O. S. A.*, 1987, **B4**, No. 4 (Apr), 462~469.
- [10] W. Happer and A. C. Tam; *Phys. Rev.*, 1977, **A16**, No. 5 (Nov), 1877~1891.

Collision-enhanced Hanle resonances in high-contrast transmission spectroscopy*

ZHANG BINGLONG AND ZHOU YINGHUA

(Department of Physics, Peking University, Beijing)

(Received 8 July 1989)

Abstract

Collision-enhanced Hanle resonances in the ground state of Na atoms with a linewidth of 1.8 mG (FWHM) have been observed in the high-contrast transmission spectroscopy. The width of these resonances still shows Dicke narrowing effect, but the signal intensity drastically increases with increasing the buffer gas pressure.

Key words: Collision-enhanced resonance; high-contrast transmission spectroscopy.

* This project supported by National Natural Science Foundation of China.