

# 电磁诱导透明窗口中温度、功率及偏振特性对四波混频信号的影响

苗一珠<sup>1</sup> 程雪梅<sup>1</sup> 任兆玉<sup>2\*</sup> 王朝晋<sup>1</sup> 白晋涛<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 西北大学物理学系, 陕西 西安 710069)

(<sup>2</sup> 西北大学光子学与光子技术研究所, 陕西 西安 710069)

**摘要** 电磁诱导透明 (EIT) 效应改变了介质的吸收特性, 导致了线性极化率的抑制和非线性极化率的提高, 从而可以实现高效率四波混频的产生。实现了基于 EIT 的高效四波混频, 且研究了样品温度、入射光功率和入射光偏振状态对四波混频信号的影响特性。研究发现, 温度对样品铷的两个同位素 <sup>87</sup>Rb 和 <sup>85</sup>Rb 的影响有所差别, 它们分别存在一个最佳工作温度使得四波混频信号最大; 四波混频信号强度正比于入射光的功率; 通过偏振调制四波混频可实现对四波混频的抑制和增强控制。

**关键词** 非线性光学; 四波混频; 电磁诱导透明; 温度; 功率; 偏振

中图分类号 O437.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0319001

## Exploration of Temperature, Power and Polarization Dependence of Four-Wave Mixing in EIT Window

Miao Yizhu<sup>1</sup> Cheng Xuemei<sup>1</sup> Ren Zhaoyu<sup>2</sup> Wang Zhaojin<sup>1</sup> Bai Jintao<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Physics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

(<sup>2</sup> Institute of Photonics and Photo-Technology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China)

**Abstract** Absorption characteristics of a medium can be changed by electromagnetically induced transparency (EIT). Linear susceptibility is suppressed and nonlinear susceptibility is enhanced, thereby four-wave mixing of higher conversion efficiency can be generated. Four-wave mixing of higher conversion efficiency in EIT window is successfully measured, and the dependence of the four-wave mixing signal on the temperature of the sample, the power and the polarization state of the input beam are discussed respectively. The result shows that 1) <sup>87</sup>Rb and <sup>85</sup>Rb are affected differently by temperature and a best temperature exists for them respectively to make the signal greatest, 2) four-wave mixing signal is proportional to the power of the input beam, and 3) the polarization could be used to restrain or strengthen the four-wave mixing signal.

**Key words** nonlinear optics; four-wave mixing (FWM); electromagnetically induced transparency; temperature; power; polarization

**OCIS codes** 190.4380; 260.5430; 190.4400

## 1 引言

四波混频(FWM)是介质中四个光电场相互作

用所引起的非线性光学现象,在弱相互作用下它是由三阶非线性极化率决定的。当两束抽运光与一束

收稿日期: 2010-06-23; 收到修改稿日期: 2010-12-06

基金项目: 国家自然科学基金(10874139)、国家 973 计划前期研究专项(2010CB434811)、教育部博士点基金(20080697002)、国家大学生创新实验(200714)支持和西北大学研究生创新基金(09YJC26)资助课题。

作者简介: 苗一珠(1986—),女,硕士研究生,主要从事四波混频的理论和实验等方面的研究。

E-mail: miaoyizhu-7305@163.com

导师简介: 白晋涛(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事激光技术与器件、非线性光学和激光光谱学等方面的研究。

E-mail: baijt@nwu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: rzy@nwu.edu.cn

信号光入射到非线性介质中后,满足相位匹配条件时会产生 FWM 相位共轭信号。通常情况下光学介质的三阶非线性极化系数总是远远小于二阶极化系数,所以 FWM 的能量转换效率很低。因此在研究 FWM 的非线性过程中提高其混频效率的方法是十分重要的课题。

自电磁诱导透明(EIT)实验成功以来,基于此现象的光与原子之间相互作用的研究已经成为新的研究热点,如在非线性光学<sup>[1]</sup>、光存储、关开关和无吸收折射率增强<sup>[2]</sup>等方面都取得了研究进展。Scully 等<sup>[3]</sup>认为 EIT 现象是耦合光与探测光之间强的相互作用对基态到激发态之间的跃迁产生了相消干涉,原子被激发到暗态,不再与探测光作用,从而表现为对探测光的透明。EIT 不仅能改变介质的吸收和色散特性,同时也导致了线性极化率的抑制和非线性极化率的提高<sup>[4]</sup>。本文在三能级系统中利用电磁诱导透明原理操控 FWM 产生。两中间能级之间的强耦合场诱导了 EIT 的产生,从而使信号场在介质中以极小的吸收传输,因此 FWM 的转换效率可以极大地提高。

实现了基于 EIT 的高效 FWM 信号的产生,以铷(Rb)元素为样品,研究样品温度,入射光功率及入射光偏振状态对 FWM 信号强度的影响,对<sup>87</sup>Rb 和<sup>85</sup>Rb 信号强度随温度,功率和偏振的变化关系进行了理论模拟和实验论证。

## 2 理论分析

三能级系统如图1(a)所示,  $|0\rangle$  为基态,  $|1\rangle$  为

中间态,  $|2\rangle$  为激发态。抽运光的几何配置如图1(b)所示,光束1的频率为  $\omega_1$ , 光束2,3的频率为  $\omega_2$ , 激光频率  $\omega_1, \omega_2$  分别趋近于  $|0\rangle$  到  $|1\rangle$ ,  $|1\rangle$  到  $|2\rangle$  的跃迁频率  $\Omega_1$  与  $\Omega_2$ 。光束1,2沿相反方向传播,2,3在样品上形成很小夹角,则满足相位匹配条件可产生频率为  $\omega_1$  的 FWM 信号  $\omega_s$ 。

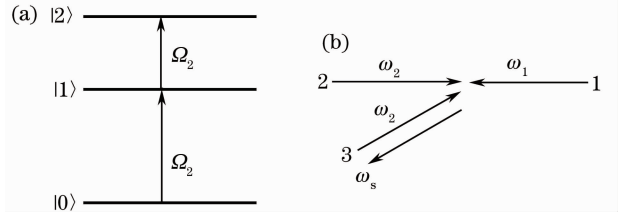


图1 (a)三能级位形图, (b)光路几何配置图  
Fig.1 (a) Three-level configuration, (b) schematic diagram of the optical geometry

根据相位共轭配置可建立复电场

$$E_1 = \mathcal{E}_1 \exp[i(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - \omega_1 t)], \quad (1)$$

$$E_2 = \mathcal{E}_2 \exp[i(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \omega_2 t)], \quad (2)$$

$$E_2 = \mathcal{E}'_2 \exp[i(\mathbf{k}'_2 \cdot \mathbf{r} - \omega_2 t)], \quad (3)$$

式中  $\mathcal{E}_i, \mathbf{k}_i$  ( $\mathcal{E}'_i, \mathbf{k}'_i$ ) 为光场振幅及光波矢量。

根据光与三能级系统相互作用的物理机制可得微扰链<sup>[5]</sup>

$$\rho_{00}^{(0)} \xrightarrow{e_1} \rho_{10}^{(1)} \xrightarrow{e_2} \rho_{20}^{(2)} \xrightarrow{(e'_2)^*} \rho_{10}^{(3)}. \quad (4)$$

首先在三能级系统中利用密度矩阵动力学方程式

$$\frac{\partial \hat{\rho}(t)}{\partial t} = \frac{1}{i\hbar} [\hat{H}_0 + \hat{H}_1(t), \hat{\rho}(t)] - \Gamma \hat{\rho}(t), \quad (5)$$

式中  $\hat{H}_1 = -\mathbf{E} \times \hat{\boldsymbol{\mu}}, \hat{\boldsymbol{\mu}}$  是跃迁偶极矩,  $\Gamma$  是弛豫率。求解(5)式得到有关三阶密度矩阵元的表达式为

$$\begin{aligned} \rho_{10}^{(3)} = & \frac{i\mu_1\mu_2^2}{\hbar^3} \mathcal{E}_1 \mathcal{E}_2 \mathcal{E}'_2 \exp[i(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 - \mathbf{k}'_2) \cdot \mathbf{r} - \omega_1 t] \int_0^\infty dt_3 \int_0^\infty dt_2 \int_0^\infty dt_1 \times \\ & \exp\{-i\mathbf{v} \cdot [\mathbf{k}_1(t_1 + t_2 + t_3) + \mathbf{k}_2(t_2 + t_3) + \mathbf{k}'_2 t_3]\} \exp[-(\Gamma_{10} + i\Delta_1)t_3] \times \\ & \exp[-(\Gamma_{20} + i\Delta_2 + i\Delta_1)t_2] \exp[-(\Gamma_{10} + i\Delta_1)t_1], \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $\mu_1, \mu_2$  分别是  $|0\rangle$  到  $|1\rangle$ ,  $|1\rangle$  到  $|2\rangle$  的跃迁偶极矩矩阵元,  $\Gamma_{10}, \Gamma_{20}$  分别是  $|0\rangle$  到  $|1\rangle$ ,  $|0\rangle$  到  $|2\rangle$  的横向弛豫率,  $\Delta_1, \Delta_2$  为共振失谐因子

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \Omega_1 - \omega_1, \quad \Delta_2 = \Omega_2 - \omega_2, \\ \Omega_1 &= \frac{E_1 - E_0}{\hbar}, \quad \Omega_2 = \frac{E_2 - E_1}{\hbar}. \end{aligned}$$

对于相位共轭四波混频信号的非线性极化强度有<sup>[6]</sup>

$$P^{(3)} = N\mu_1 \int_{-\infty}^{\infty} d\mathbf{v} W(\mathbf{v}) \rho_{10}^{(3)}(\mathbf{v}) \quad (7)$$

式中  $N$  为原子数,  $W(\mathbf{v})$  为速度分布函数, 表示为

$$W(\mathbf{v}) = \frac{1}{\sqrt{\pi}u} \exp\left[-\left(\frac{\mathbf{v}}{u}\right)^2\right],$$

式中  $u = \sqrt{\frac{2k_B T}{m}}$ ,  $m$  为原子质量,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为绝对温度。FWM 信号强度正比于  $P^{(3)}$  绝对

值平方的平均值：

$$I_0 \propto |\langle P^{(3)} \rangle|^2. \quad (8)$$

考虑介质的吸收后，FWM 信号经过长度为  $l$  的 Rb 原子介质后，其强度变化为<sup>[7]</sup>

$$I(l) = I_0 \exp\left(-\frac{\omega_s^2}{kc^2} \alpha l\right), \quad (9)$$

式中  $\alpha$  为介质的吸收系数。

### 3 实验研究

图 2(a) 为与实验相关的 Rb 原子能级图，其中 D 为硅光探测器，APD 为雪崩二极管，PBS 为偏振分束器，WP 为波片。实验采用 EIT 来减少介质的共振吸收。图中  $\Delta_1 = -\Delta_2$  表示激光场与相应跃迁能级之间

的频率失谐量，在梯形三能级中要形成 EIT，失谐量需满足  $\Delta_1 = -\Delta_2$ 。实验光路如图 2(b) 所示，其中  $\omega_1, \omega_2, \omega'_2$  分别代表三束入射光，它们对应的波长分别为 780.157, 776.978 和 776.978 nm。满足相位匹配条件时得到波长为 780.157 nm 的 FWM 信号  $\omega_s$ ，其方向与  $\omega'_2$  几乎相反<sup>[8]</sup>。光源为两个外腔式半导体激光器，中心波长分别为 780.157 nm 和 776.978 nm。垂直偏振的抽运光  $\omega_2$  和  $\omega'_2$  的功率约为 65 mW，水平偏振的探测光  $\omega_1$  的功率约为 2.2 mW。硅光探测器 (D) 用来探测吸收信号，雪崩二极管 (APD) 用来探测 FWM 信号。通过仔细调节各激光束的夹角，产生出来的 FWM 信号可以处于 EIT 窗口中，从而在原子样品池里低损耗地传播。

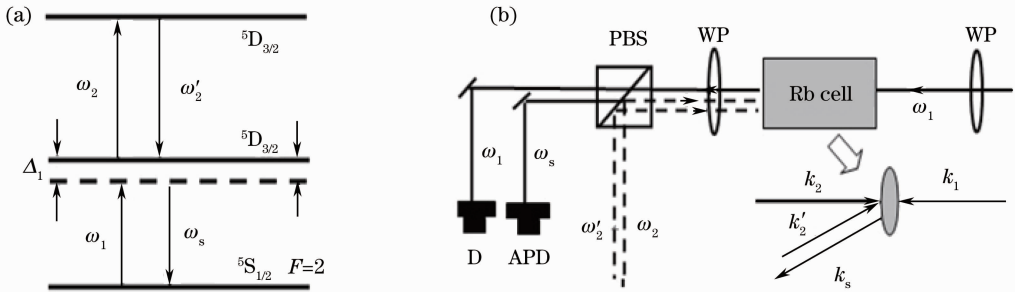


图 2 (a) Rb 原子能级图, (b) FWM 实验简图

Fig. 2 (a) Energy level structure of Rb, (b) schematic of the experimental setup for FWM

实验样品为 Rb 蒸气，其包含  $^{87}\text{Rb}$  和  $^{85}\text{Rb}$ 。实验测量了  $60\text{ }^\circ\text{C} \sim 100\text{ }^\circ\text{C}$  范围内的 FWM 信号随温度的变化规律。入射光功率的调节由  $1/2$  波片 (HWP) 和偏振分光立方体 (PBS) 组合来实现。 $\omega_1$  的偏振方向由 HWP 来改变，实验分别研究了  $\omega_1$  的偏振角为  $0, 20^\circ, 30^\circ$  和  $45^\circ$  时 FWM 信号强度随  $\omega'_2$  功率变化的规律。

## 4 结果分析

### 4.1 温度特性

图 3 为样品温度在  $60\text{ }^\circ\text{C} \sim 100\text{ }^\circ\text{C}$  范围内 FWM 信号强度随温度变化的实验结果和理论模拟曲线。理论上研究温度特性是从温度对样品的影响入手，得到原子数密度和温度的关系，进一步得到 FWM 信号强度随温度的变化关系。对于 Rb 原子来说，饱和蒸气压  $P_v$  和温度关系为<sup>[9]</sup>

$$\lg P_v = -94.04826 - \frac{1961.258}{T} - 0.03771687T + 42.57526 \lg T (T < 39.31\text{ }^\circ\text{C}), \quad (10)$$

$$\lg P_v = 15.88253 - \frac{4529.639}{T} + 0.00058663T - 2.99138 \lg T (T > 39.31\text{ }^\circ\text{C}), \quad (11)$$

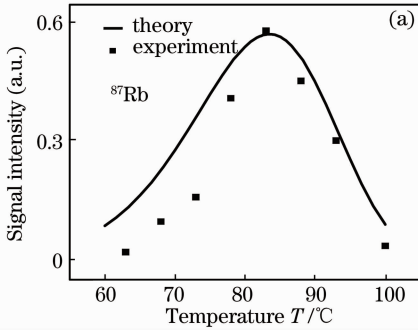
式中  $T$  为 Rb 原子的温度。当把饱和蒸气压看作理想气体时，利用公式  $P_v = Nk_B T$ ，可得原子数密度

$$N(T) = \frac{P_v}{k_B T}.$$

在对 (9) 式进行理论模拟时，需要考虑的是：由于自然界中  $^{87}\text{Rb}$  与  $^{85}\text{Rb}$  丰度不同， $^{87}\text{Rb}$  约为 27.9%， $^{85}\text{Rb}$  为 72.1%<sup>[10]</sup>，故相应的原子数密度为  $N_{85}(T) = 72.1\%N(T)$ ， $N_{87}(T) = 27.9\%N(T)$ 。

图 3 给出了信号强度随温度变化的实验曲线与理论模拟曲线，可以得出：1)  $^{87}\text{Rb}$  的最佳工作温度在  $83\text{ }^\circ\text{C}$ ，而  $^{85}\text{Rb}$  的最佳工作温度在  $86\text{ }^\circ\text{C}$ ，这是由  $^{87}\text{Rb}$  的吸收系数与  $^{85}\text{Rb}$  的吸收系数随温度的变化存在差异所导致的，而温度对吸收系数的影响主要表现在温度对有效原子数密度的影响，因此两者最佳温度不同的根本原因是由它们在自然界中丰度不同造成的<sup>[11]</sup>； $^{87}\text{Rb}$  与  $^{85}\text{Rb}$  的信号强度随温度的升

高会出现先增大后减小的变化趋势,主要是因为随着温度的增加,参与 FWM 信号产生的有效原子数增多,使得信号变大,但同时,介质对信号的吸收也更加剧烈,从而导致了曲线的先上升后下降的趋势;



2)在同一工作温度下<sup>85</sup>Rb 的信号强度都要比<sup>87</sup>Rb 的大,这是因为样品池中<sup>85</sup>Rb 的有效原子数密度大于<sup>87</sup>Rb 的密度;3)实验曲线与理论模拟曲线基本符合,确定了样品的最佳工作温度。

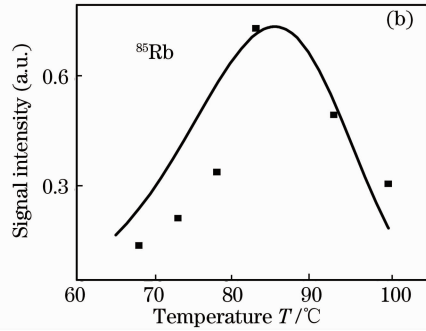


图 3 FWM 信号强度随温度的变化曲线。(a)<sup>87</sup>Rb,(b)<sup>85</sup>Rb

Fig. 3 Dependence of FWM signal intensity on temperature for (a) <sup>87</sup>Rb and (b) <sup>85</sup>Rb respectively

#### 4.2 入射光功率和偏振状态对 FWM 信号强度的影响

实验中通过改变入射光  $\omega_1$  的偏振方向来观察偏振态对信号强度如何进行调制,随后在确定的偏振角下对信号强度随入射光  $\omega_2$  功率的变化进行了实验测量和理论模拟,如图 4 所示。实验利用 HWP 和 PBS 的组合实现通过旋转 HWP 的角度来改变功率。理论上,当光束  $\omega_2$  经一个 HWP 和 PBS 作用后,其电场强度变化为  $E'_2 = E_2(0)\cos 2\phi$ , 式中  $\phi$  是 HWP 旋转过的角度。而功率与电场强度间存在着  $P = |E|^2 S$  的关系,其中  $S$  是光斑面积。因此光束  $\omega_2$  的功率为

$$P(\phi) = P(0)\cos^2 2\phi. \quad (12)$$

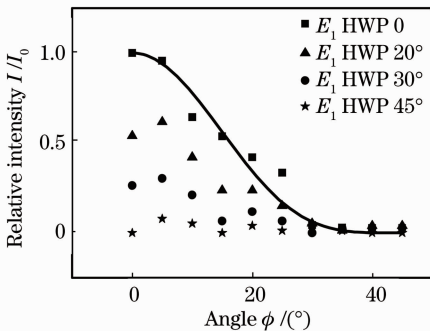


图 4  $\omega_1$  的不同偏振态下 FWM 信号相对强度随抽运光  $\omega_2$  功率的变化曲线图

Fig. 4 Dependence of FWM signal intensity on the power of  $\omega_2$  for different polarization of  $\omega_1$

从(8)式可得出 FWM 信号强度正比于入射光电场强度的平方,所以 FWM 信号强度正比于入射光功率,因为入射光功率随着波片角的变化规律为  $\cos^2 2\phi$ ,所以信号强度随波片角的变化规律也为

$\cos^2 2\phi$ 。

探测光  $\omega_1$  及抽运光  $\omega_2, \omega'_2$  在波片作用前分别为水平及垂直偏振。当 HWP 的角度从 0 逐渐变化为 45°时,FWM 信号强度的变化如图 4 所示,分析比较 4 组数据可得出:1) 在  $\omega_1$  为一特定偏振方向下,随着入射光功率的减弱,信号强度减弱且按  $\cos^2 2\phi$  的衰减规律变化,这与理论一致;2)在 HWP 的半个变化周期 0~45°范围内,相应数据呈整体下降趋势,在偏振角为 0 处信号强度最大,45°时信号最小,即  $\omega_1$  为水平偏振时的 FWM 信号最强, $\omega_1$  为垂直偏振时的信号最弱。当三束入射光都为线偏振时,FWM 信号也为线偏振,若其中一束入射光为椭圆或圆偏振时,FWM 信号也为椭圆或圆偏振。

## 5 结 论

分别在理论上和实验上研究了 EIT 窗口中 Rb 原子的 FWM 信号的温度特性、功率以及偏振特性。总结出以下结论:FWM 信号强度随温度的升高呈现先增大后减小的变化趋势,<sup>87</sup>Rb 和 <sup>85</sup>Rb 分别存在一个最佳的工作温度;FWM 信号强度正比于入射光的功率;入射光偏振状态对 FWM 信号有调制作用。这些初步的研究将为进一步研究和应用该技术提供参考。

## 参 考 文 献

- 1 S. E. Harris, J. E. Field, A. Imamoglu. Nonlinear optical processes using electromagnetically induced transparency [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **64**(10): 1107~1110
- 2 Marlan O. Scully. Enhancement of the index of refraction via quantum coherence [J]. *Phys. Rev. A*, 1991, **67**(14): 1855~1858

- 3 M. O. Scully, M. S. Zubairy. *Quantum Optics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 15~17
- 4 Gao Feng, Ye Chenguang, Wang Pengjun *et al.*. Experimental investigation of electromagnetically-induced-transparency-like effect in optical coupled-resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(9): 2565~2569  
高峰, 叶晨光, 王鹏军等. 光学耦合腔中类电磁感应透明现象的实验研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(9): 2565~2569
- 5 Zhang Yanpeng, Tang Tiantong, Fu Panming. Polarization beats in a four-level system[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(4): 445~451  
张彦鹏, 唐天同, 傅盘铭. 四能级系统的极化拍频[J]. *光学学报*, 1999, **19**(4): 445~451
- 6 Wang Yingzong, Liu Shumin, Xu Beilei *et al.*. Effect of time delay in FWM on intensity of output signal[J]. *J. Shaanxi Normal University(Natural Science Edition)*, 1997, **25**(2): 30~34  
王英宗, 刘淑敏, 许蓓蕾等. 四波混频中光束延迟对信号强度的影响[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 1997, **25**(2): 30~34
- 7 Shi Shunxiang, Chen Guofu, Zhao Wei *et al.*. *Nonlinear Optics* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2003  
石顺祥, 陈国夫, 赵卫等. *非线性光学*[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003
- 8 Cao Jinfeng. The application of four-wave mixing theory in highly excited level[J]. *Physics Bulletin*, 2009, **4**: 56  
曹谨丰. 四波混频的原理在高激发态中的应用[J]. *物理通报*, 2009, **4**: 56
- 9 A. N. Nesmeyanov. *Vapor Pressures of the Chemical Elements* [M]. New York: Elsevier, 1963
- 10 Daniel A. Steck. Rubidium <sup>87</sup>D Line Data[EB/OL]. <http://steck.us/alkalidata/>, 2003
- 11 Yao Jingqin, Zhang Yao, Hou Feiyan *et al.*. Temperature dependence of Rb D<sub>2</sub> line in saturation spectroscopy[J]. *J. Atomic and Molecular Physics*, 2008, **25**(5): 1059~1062  
姚景芹, 张尧, 侯飞雁等. 温度对铷原子 D<sub>2</sub> 线饱和吸收光谱的影响[J]. *原子与分子物理学报*, 2008, **25**(5): 1059~1062