

# 调控 EIT 气体折射率实现对布儒斯特角的控制

许森东<sup>1,2</sup>, 庄 飞<sup>2</sup>

(1. 浙江科技学院 理学院, 杭州 310023; 2. 杭州师范大学 理学院, 杭州 310018)

**摘 要:** 提出了电磁感应透明(EIT)介质的一个新的相干操纵应用:控制电磁感应透明气体折射率实现对布儒斯特角的调控。将一定密度的 EIT 原子气体充入 2 块玻璃材料中,计算表明光从玻璃入射 EIT 原子气体的布儒斯特角随外控制场而变。通过改变控制光的拉比频率等场外参数即可达到对布儒斯特角的调控。

**关键词:** 电磁感应透明;布儒斯特角;拉比频率;相干操纵

**中图分类号:** O734

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-8798(2012)01-0006-04

## Controlling Brewster angle via manipulation of refractive index of electromagnetically induced transparency vapor

XU Sen-dong<sup>1,2</sup>, ZHUANG Fei<sup>2</sup>

(1. School of Sciences, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China;

2. School of Science, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** A new application of coherent manipulation of EIT (electromagnetically induced transparency) medium is suggested, that is controlling the Brewster angle via manipulation of refractive index of electromagnetically induced transparency vapor. The EIT atomic vapor are filled on the background of two pieces glass whose refractive index is 1.5. By manipulating the refractive index of the EIT vapor via the external control field, one can obtain the controllable Brewster angle that is sensitive to the variations of external conditions (e. g. the intensity of the control field). It is shown that Controlling the Brewster angle can be achieved by choosing the specific parameters such as the Rabi frequency of control light.

**Key words:** electromagnetically induced transparency; Brewster angle; Rabi frequency; coherent manipulation

电磁感应透明(electromagnetically induced transparency)现象,简称 EIT。EIT 现象为:当一束共振光(即探针光)射入 EIT 原子气体介质时,该光会被 EIT 介质所吸收,但是如果又有另一束共振光(强控制

光)射入该 EIT 原子气体介质之后,2 束光将都不再被 EIT 原子气体吸收,它们同时都可以几乎没有损耗地在 EIT 介质中传输。从物理原理方面讲,电磁感应透明源于多能级原子系统从基态跃迁到激发态的过程中所产生的量子相干和相消量子干涉效应<sup>[1]</sup>。由于 EIT 在近共振光传播过程中表现了丰富的光学性质,所以近年来受到了越来越多的关注,同时也成为人工电磁介质热门研究领域之一。电磁感应透明自 1991 年由 Harris 小组完成第一个实验以来,无论是在理论上还是在实验当中都获得了巨大的进步。实现 EIT 的条件是控制光(control light)的强度要远远大于探针光(probe light)的强度。在这个条件下,EIT 原子气体基态自动变成暗态,这时探针光在强控制光的量子干涉的作用下可实现完全没有损耗的传输<sup>[2]</sup>。电磁感应透明效应可以产生很多新型有趣的应用,甚至可以预测其在量子光学器件设计方面也将会有重要的应用价值。EIT 气体介质的感应透明特性可以使人们对人工电磁奇异复合材料的光学性质进行相干操纵,从而预期其在不久的将来能给人类带来很多有意义的实际应用,例如电磁感应聚焦、慢光传输、光信息存储、原子基态的冷却<sup>[3]</sup>等。

晶体的布儒斯特角在光学领域中有很多用途,如利用晶体的布儒斯特角可以制成对于非常光线有很高透射率的新型空气间隔的偏振棱镜。在激光技术中经常用这种办法来减少反射光能的损失,如外腔式气体激光管的窗片就是按布儒斯特角封装的(故称为布儒斯特窗);应用布儒斯特角原理也可制作由玻片堆构成的起偏器等。如果人们能够通过外部条件的改变控制布儒斯特角,就可以通过调控外部控制场等条件达到对上述技术的最佳结构设计。

本研究结果显示,在折射率为 1.5 的玻璃背景材料中充入电磁感应透明材料(EIT 原子气体),通过改变控制光拉比频率、气体密度、控制光强度或者失谐频率等外场参数,都可以改变气体材料的介电常数,从而实现在借助外部条件下对布儒斯特角的调控。

## 1 布儒斯特定律

自然光经电介质界面反射后,反射光为线偏振光所满足的条件先是由英国物理学家 D. Brewster 于 1815 年观测到的。他发现当自然光在电介质分界面上反射和折射的时候,通常情况下反射光和折射光都是部分偏振的;但是,当入射角为某一个特定角度的时候,其反射光变为线偏振光,且振动方向与入射面是垂直的,把这个角度叫作起偏角。由于是 D. Brewster 最先发现,所以通常把这个角度叫作布儒斯特角。角度的大小表示为  $\theta_b = \arctan(n_2/n_1)$ ,此结果人们通常称为布儒斯特定律。当光在布儒斯特角入射至介质分界面上时,反射光的电矢量就无平行分量,而且反射光与折射光是互相垂直的,如图 1 所示。

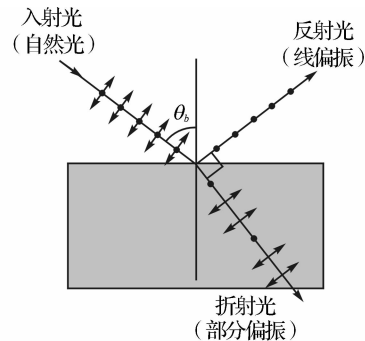


图 1 布儒斯特角

Fig. 1 Brewster angle

## 2 电磁感应透明(EIT)周期性材料性质

本研究考虑  $\Lambda$  型三能级系统中的电磁感应透明特性,如图 2 所示。 $\Lambda$  型三能级系统包含有 2 个基态与  $|2\rangle$  和  $|3\rangle$  一个激发态  $|1\rangle$ ,其中  $|2\rangle$ 、 $|1\rangle$  能级之间的跃迁受到弱探针光激发,  $|3\rangle$ 、 $|1\rangle$  能级之间的跃迁受到强控制光激发。探针光与控制光的频率失谐分别为  $\Delta_p$  与  $\delta_c$ ,  $\Gamma$  与  $\gamma$  分别是各个能级的自发辐射率与无辐射衰变率。

设电磁感应透明原子气体(EIT 气体)的原子数密度是  $N$ ,这种气体相对于弱探针光的相对折射率  $n_2 = \sqrt{\epsilon}$ ,其中  $\epsilon$  为 EIT 气体的介电系数(在这里考虑局域场修正):

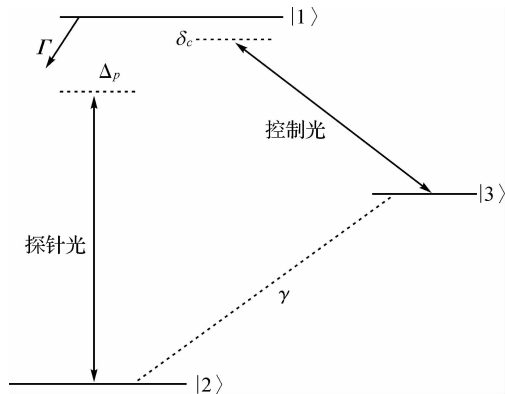


图 2 三能级  $\Lambda$  型系统

Fig. 2  $\Lambda$ -type three-level system

$$\epsilon = 1 + \frac{N\beta_e}{1 - \frac{N\beta_e}{3}} \quad (1)$$

式(1)中: $\beta_e$  为原子的电极化率, $\beta_e$  的表达式为

$$\beta_e = \frac{i|D_{12}|^2}{\epsilon_0 \hbar} \cdot \frac{\gamma + i(\Delta_p - \delta_c)}{Z} \quad (2)$$

$$\text{式(2)中} \quad Z = (\Gamma + i\Delta_p) \cdot [\gamma + i(\Delta_p - \delta_c)] + \frac{1}{4}\Omega_c^* \Omega_c \quad (3)$$

在以上的这些公式中,探针光和控制光的频率失谐分别为  $\Delta_p = \omega_{12} - \omega$ ,  $\delta_c = \omega_{13} - \omega_c$ , 其中  $\omega, \omega_c$  分别为探针光、控制光的模式频率。其中  $\omega_{12}$  和  $\omega_{13}$  分别为  $|1\rangle - |2\rangle$  与  $|1\rangle - |3\rangle$  能级之间的跃迁频率。 $\Omega_c$  为控制光的 Rabi 频率,定义为  $\Omega_c = \frac{D_{13}E_c}{\hbar}$ , 其中  $D_{13}$  是  $|3\rangle - |1\rangle$  跃迁电偶极矩阵元,  $E_c$  是控制光慢变振幅。对于一个典型的三能级  $\Lambda$  原子系统(如碱金属原子),以上公式中的典型参数可以取作如下:  $|1\rangle$ 、 $|2\rangle$  能级跃迁偶极矩  $D_{12} = 1.0 \times 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m}$ , 自发辐射率  $\Gamma = 1.2 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ 。无辐射衰变率  $\gamma = 0.6 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 。由式(1)~(3)可知, $\epsilon$  的值随原子电极化率  $\beta_e$  值的变化而变化, Rabi 频率  $\Omega_c$  的改变会引起原子电极化率  $\beta_e$  的变化。因此  $\Omega_c$  的变化会直接导致 EIT 介质介电常数  $\epsilon$  的改变,所以折射率  $n$  可以由控制光的 Rabi 频率  $\Omega_c$  调控,从而通过改变 Rabi 频率  $\Omega_c$  就可以实现对布儒斯特角的调控。

本文所研究的 EIT 调控布儒斯特角结构如图 3 所示,是在 2 块玻璃材料中注入 EIT 原子气体。探针光在此结构中的传播,随着控制光强度的变化,气体介电常数将发生改变,最终达到通过 EIT 原子气体调控布儒斯特角的目的。

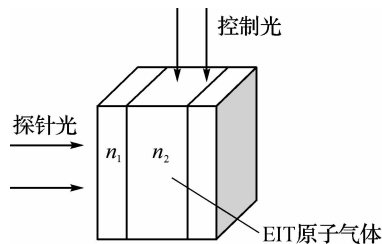


图 3 EIT 调控布儒斯特角结构

Fig. 3 Structure of controlling Brewster angle by EIT

### 3 EIT 原子气体调控布儒斯特角计算结果

在背景材料中注入 EIT 原子气体,结构如图 3 所示。笔者选取折射率  $n_1$  为 1.5 的玻璃背景材料。选择参数  $\Gamma = 1.2 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ ,  $\gamma = 1.2 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ ,  $\Delta_p = 1.0 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ ,  $\delta_c = 0$ ,  $\Omega_c = 1.0 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ ,  $N = 1.092 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ 。

EIT 气体相对折射率  $n_2$  随拉比频率变化如图 4 所示;光从玻璃入射 EIT 原子气体的布儒斯特角由控制光拉比频率调控的计算结果如表 1 所示,变化规律如图 5 所示;在不同的拉比频率下,当光以布儒斯特角入射时其反射率  $R$  如图 6 所示。

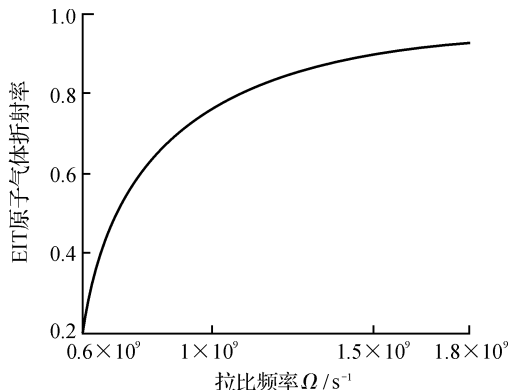


图 4 EIT 原子气体折射率随拉比频率  $\Omega$  变化

Fig. 4 EIT atomic vapor refractive index changing with Rabi frequency

表 1 用拉比频率调控布儒斯特角计算结果

Table 1 Results of controlling Brewster angle by Rabi frequency

拉比频率 $\Omega_c / \text{s}^{-1}$	介质的相对 折射率 $n_2$	布儒斯特角 $\theta_b / (^\circ)$
$0.6 \times 10^9$	0.205	7.777
$0.7 \times 10^9$	0.493	18.184
$0.8 \times 10^9$	0.625	22.615
$0.9 \times 10^9$	0.708	25.254
$1.0 \times 10^9$	0.765	27.015
$1.1 \times 10^9$	0.806	28.259
$1.2 \times 10^9$	0.838	29.176
$1.3 \times 10^9$	0.862	29.875
$1.4 \times 10^9$	0.881	30.421
$1.5 \times 10^9$	0.896	30.857
$1.6 \times 10^9$	0.909	31.21
$1.7 \times 10^9$	0.919	31.5
$1.8 \times 10^9$	0.928	31.742

从表 1、图 4 和图 5 可以看出,气体相对折射率和布儒斯特角随着拉比频率变化。当拉比频率在  $0.6 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$  附近时,折射率和布儒斯特角随拉比频率变化非常快,随着拉比频率的增加,其变化变得越来越缓慢。从图 6 可以看出,当光以布儒斯特角入射时,其反射率随拉比频率的变化呈来回震荡变化,当拉比频率从  $0.6 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$  逐渐增大时,其反射率变化频率越来越慢。

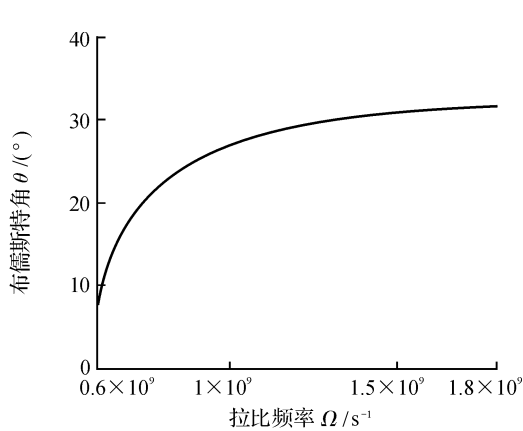


图 5 布儒斯特角随拉比频率  $\Omega$  变化

Fig. 5 Brewster angle changing with Rabi frequency

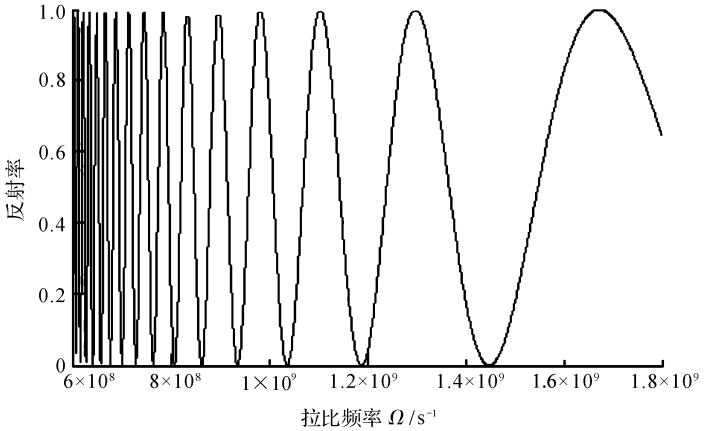


图 6 在不同的拉比频率下光以布儒斯特角入射的反射率

Fig. 6 Reflectivity of light by Brewster angle with different Rabi frequency

4 结 语

从研究结果可以看出,通过改变控制光拉比频率,就可以实现对布儒斯特角的调控。因此,可以通过调控 EIT 原子气体的外部控制场等条件达到布儒斯特角在光学领域中应用的最佳结构设计。

实现可人工控制布儒斯特角的关键在于调控 2 种材料的折射率差,其要点在于由电磁感应透明气体构成的结构。电磁感应透明材料的功能是实现折射率可控<sup>[4-5]</sup>,进而达到调控布儒斯特角的目的。实际上,通过改变 EIT 介质的 control light 的拉比频率、无辐射衰变率、原子数密度及自发辐射率等外场参数,都可以改变电磁感应透明原子气体的介电常数值<sup>[2]</sup>;但是,所有这些参数当中 control light 的拉比频率对电磁感应透明介质的介电常数调控是最有用的,因为它的调控机理就像光开关一样,这对于未来人们设计新型光通信器件具有十分重要的实际意义。电磁感应透明原子气体能够使探针光在介质中损耗极小甚至完全透明,而且探针光的传输情况完全可以由场外的参数来控制,因此它完全可以作为人工操纵光传输的理想介质,同时如果能够将它同其他人造光通信材料结合,就可以设计出很多具有实际意义的光器件。

参考文献:

[1] Scully M O, Zubairy M S. Quantum Optics[M]. Cambridge: Cambridge University Press,1997:220-210.  
[2] 庄飞,沈建其,叶军. 调控电磁感应透明气体折射率实现可控光子带隙结构[J]. 物理学报,2007,56(1):541-545.  
[3] 叶军,庄飞. 二维椭圆柱长方晶格可控光子带隙研究[J]. 杭州师范学院学报:自然科学版,2007,6(4):271-274.  
[4] 张亚茹,孔令凯,冯卓宏,等. 基于电磁感应透明的二维可控光子晶体分功率器[J]. 福建师范大学学报:自然科学版,2009,25(6):42-46.  
[5] 吴海华,庄飞,叶军. 二维圆柱六边形晶格光子晶体可控光子带隙计算[J]. 湖州师范学院学报,2008,30(2):32-35.