

电磁感应透明

(Electromagnetically
induced transparency)

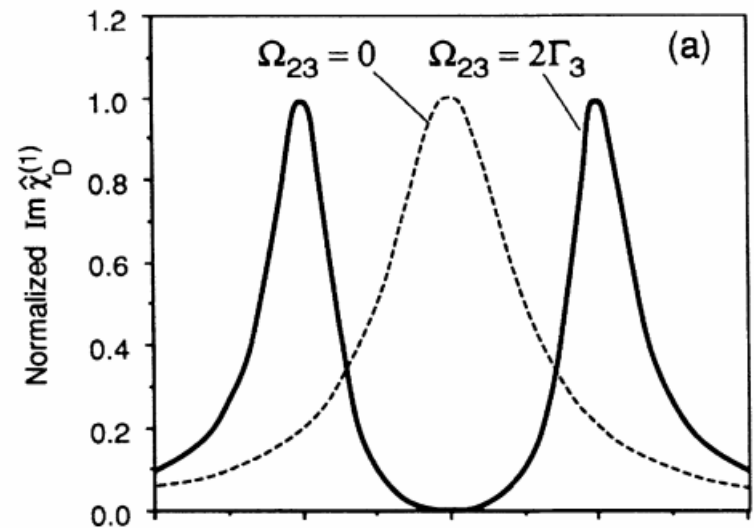
甘天奕 刘雨轩 黄礼鸿

目录

- EIT简介
- EIT理论
 1. 原子体系推导
 2. 光学体系推导
- EIT应用
 1. 无反转激光
 2. 光延迟与光储存
 3. 生物传感器 (biosensor)

EIT简介

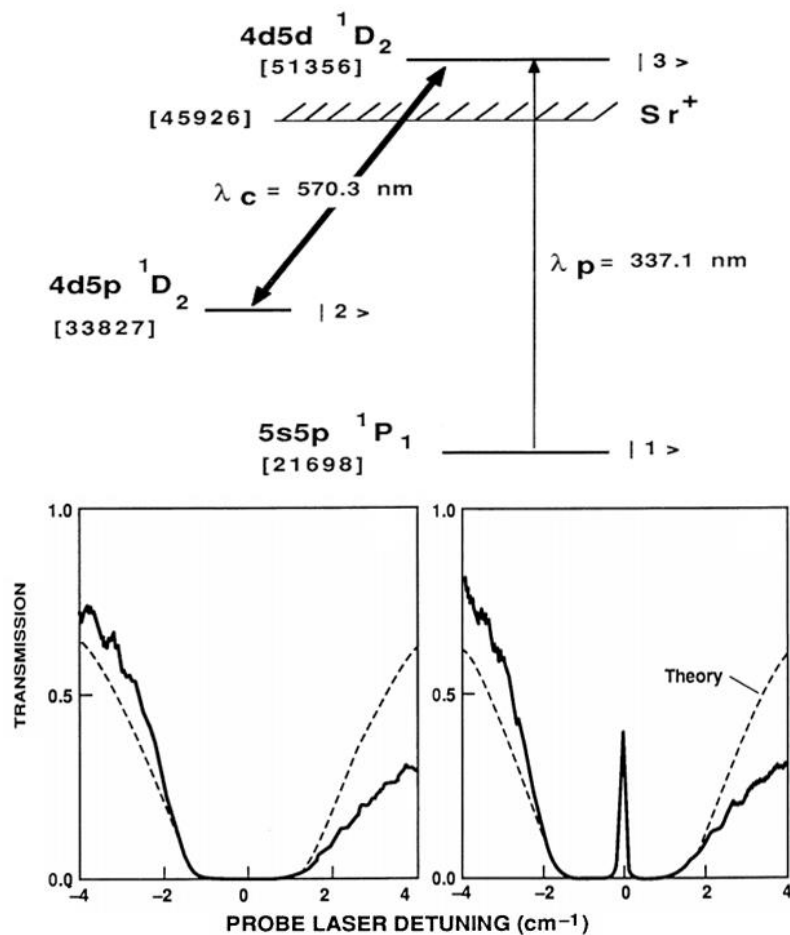
EIT即electromagnetic induced transparency, 个人认为更好的翻译是“电磁致介质透明化”。其物理图像简单来说, 是利用外加电磁场控制材料的光响应特性(optical response), 从而在满足一定条件时实现对特定波段透射率的显著提升。这一现象最早由Harris和Imamoglu在理论上提出, 并且在1991年首次在铯原子的三能级体系上观测到。



Harris SE, Field JE, Imamoglu A. Nonlinear optical processes using electromagnetically induced transparency. Phys Rev Lett 1990;64:1107.

EIT简介

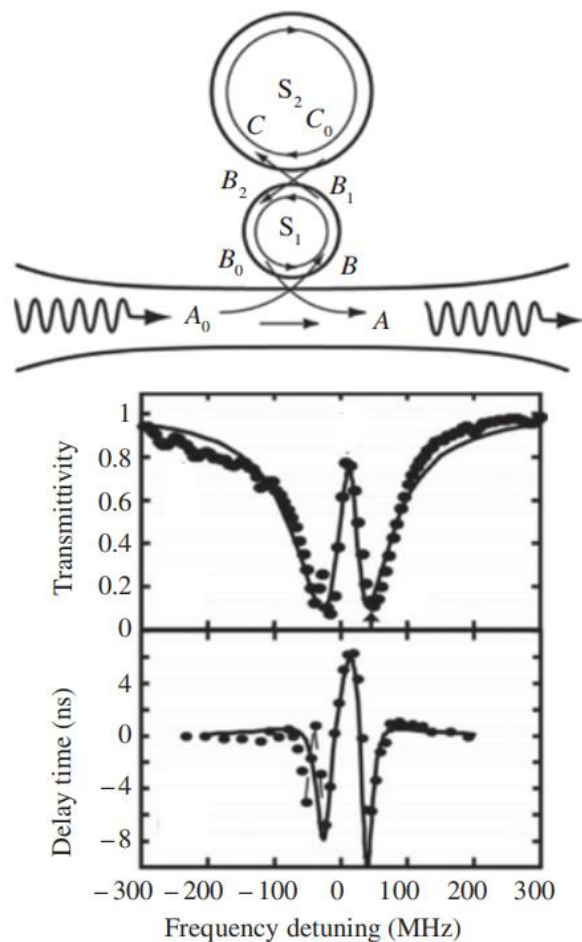
最早观测到EIT的是在锶的5s5p到4d5d跃迁，从透射谱可以清晰的看出，在加上对应于4d5p到4d5d跃迁的调制激光时，在本该被吸收的337.1nm透射谱线上出现一尖峰



Boller KJ, Imamoglu A, Harris SE. Observation of electromagnetically induced transparency. Phys Rev Lett 1991;66:2593.

EIT简介

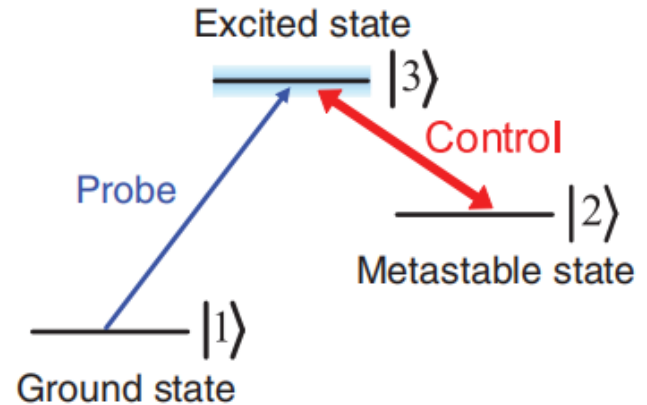
近年在光学体系中，利用微腔模式与光场的作用，可以模拟原子体系的三能级系统，同样也观测到EIT现象。利用共振吸收被消除时的粒子/光场分布EIT有许多光学上的应用。



Totsuka K, Kobayashi N, Tomita M. Slow light in coupled-resonator-induced transparency. Phys Rev Lett 2007;98:213904.

EIT理论（原子体系）

在原子体系中用bare-state三能级体系推导EIT，probe为探测场，control为控制场一般远强于探测场。



Liu Y C , Li B B , Xiao Y F . Electromagnetically induced transparency in optical microcavities. Nanophotonics,2017;6(5): 789–811

EIT理论（原子体系）

在近似下可以得到体系的有效哈密顿量

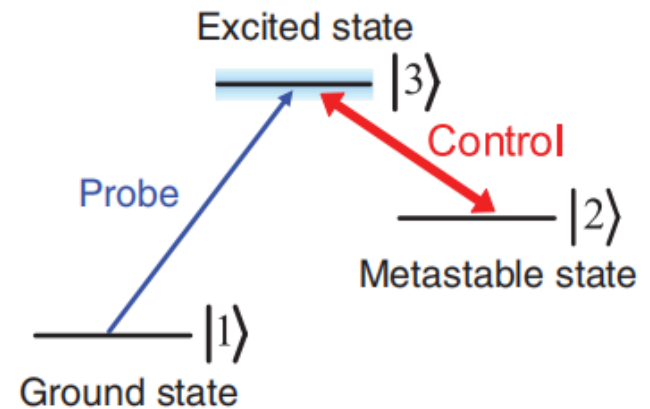
$$H_{\text{eff}} = \left(-\Delta_1 - i\frac{\Gamma_3}{2}\right)\sigma_{33} + \left(-\Delta_2 - i\frac{\Gamma_2}{2}\right)\sigma_{22} + (\Omega_c\sigma_{32} + \Omega_p\sigma_{31} + \text{H.c.}),$$

在薛定谔绘景中求解各态概率

$$\dot{c}_1 = -i\Omega_p^* c_3,$$

$$\dot{c}_2 = \left(i\Delta_2 - \frac{\Gamma_2}{2}\right)c_2 - i\Omega_c^* c_3,$$

$$\dot{c}_3 = \left(i\Delta_1 - \frac{\Gamma_3}{2}\right)c_3 - i\Omega_c c_2 - i\Omega_p c_1.$$



Liu Y C , Li B B , Xiao Y F . Electromagnetically induced transparency in optical microcavities. Nanophotonics,2017;6(5): 789–811

EIT理论（原子体系）

假设处于基态的概率为1，可得稳态解

$$c_3 = \frac{i\Omega_p}{i\Delta_1 - \frac{\Gamma_3}{2} + \frac{|\Omega_c|^2}{i\Delta_2 - \frac{\Gamma_2}{2}}}.$$

可以看出，在有控制场 Ω_c 时原子处于激发态的概率降低，意味着吸收的减弱，对应于一个透明窗口。

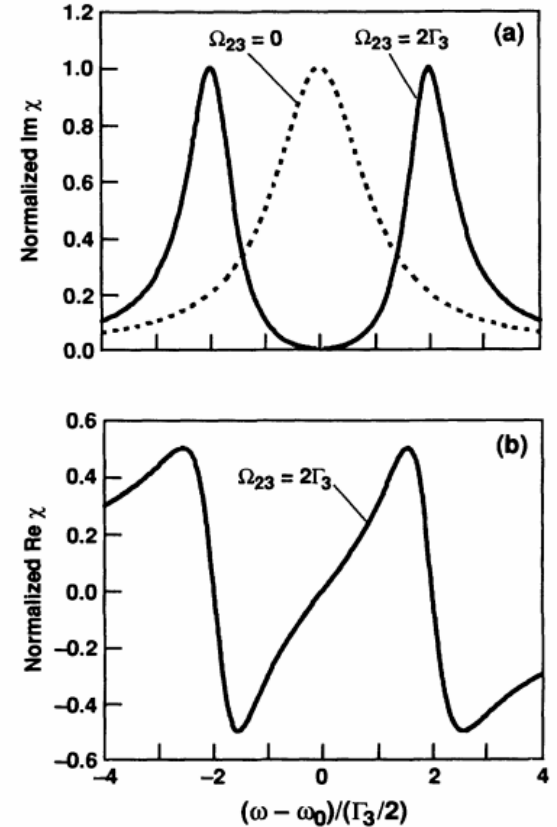
EIT理论（原子体系）

利用原子体系的吸收与跃迁有 $P = N\mu_{13}c_3^*$
 对比 $P = \varepsilon_0\chi E$ 可得 $\chi = N\mu_{13}c_3^*/\varepsilon_0 E$

$$\chi' = \frac{N|\mu_{13}|^2}{\varepsilon_0\hbar} \frac{1}{Z} \left[\Delta_2(\Delta_1\Delta_2 - |\Omega_c|^2 - \frac{\Gamma_2\Gamma_3}{4}) + \frac{\Gamma_2}{4}(\Delta_1\Gamma_2 + \Delta_2\Gamma_3) \right]$$

$$\chi'' = \frac{N|\mu_{13}|^2}{\varepsilon_0\hbar} \frac{1}{Z} \left[\frac{\Delta_2}{2}(\Delta_1\Gamma_2 + \Delta_2\Gamma_3) - \frac{\Gamma_2}{2}(\Delta_1\Delta_2 - |\Omega_c|^2 - \frac{\Gamma_2\Gamma_3}{4}) \right]$$

$$Z^2 = \frac{1}{4}(\Delta_1\Gamma_2 + \Delta_2\Gamma_3)^2 + (\Delta_1\Delta_2 - |\Omega_c|^2 - \frac{\Gamma_2\Gamma_3}{4})^2$$



Harris SE, Field JE, Kasapi A. Dispersive properties of electromagnetically induced transparency. Phys. Rev. A **46**, R29(R)

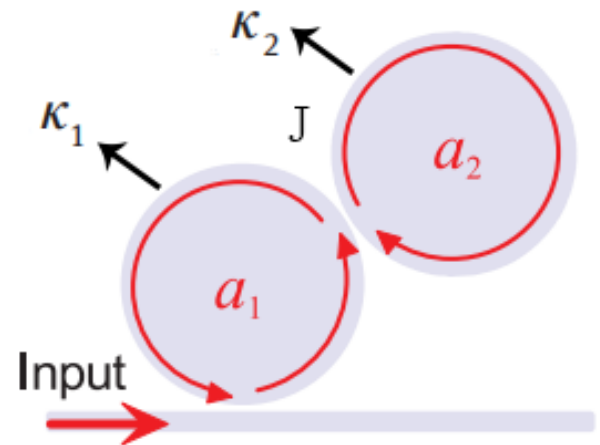
EIT理论（光学体系）

在光学体系中，我们利用光场模代替原子能级，因此将原子态替换为光场的产生湮灭算符，有效哈密顿量为

$$H_{\text{eff}} = \left(-\Delta_1 - i\frac{\kappa_1}{2}\right)a_1^\dagger a_1 + \left(-\Delta_2 - i\frac{\kappa_2}{2}\right)a_2^\dagger a_2 + J(a_1^\dagger a_2 + a_2^\dagger a_1) + (\Omega_p a_1 + \text{H.c.}),$$

同样可得场演化方程

$$\dot{a}_1 = \left(i\Delta_1 - \frac{\kappa_1}{2}\right)a_1 - iJ a_2 - i\Omega_p,$$
$$\dot{a}_2 = \left(i\Delta_2 - \frac{\kappa_2}{2}\right)a_2 - iJ a_1.$$



Liu Y C , Li B B , Xiao Y F . Electromagnetically induced transparency in optical microcavities. Nanophotonics,2017;6(5): 789–811

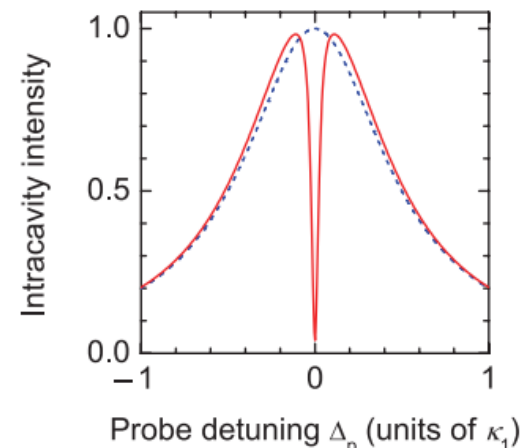
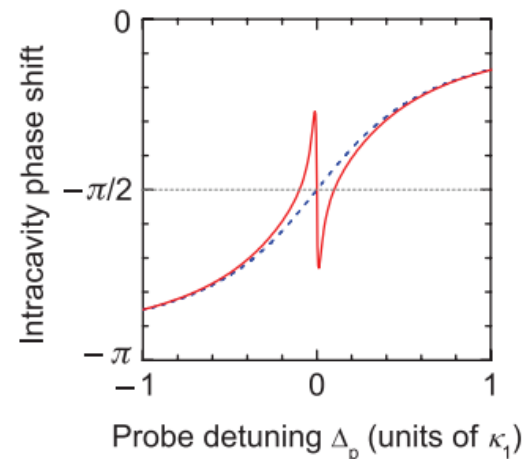
EIT理论（光学体系）

从演化方程解出稳态解，与原子体系对比可以看出如下对应关系 $\Omega_c \leftrightarrow J, \Gamma_3 \leftrightarrow \kappa_1, \Gamma_2 \leftrightarrow \kappa_2$

$$a_1 = \frac{i\Omega_p}{i\Delta_1 - \frac{\kappa_1}{2} + \frac{J^2}{i\Delta_2 - \frac{\kappa_2}{2}}}, \quad c_3 = \frac{i\Omega_p}{i\Delta_1 - \frac{\Gamma_3}{2} + \frac{|\Omega_c|^2}{i\Delta_2 - \frac{\Gamma_2}{2}}}$$

透射率如下，在 $\Delta_{1,2}$ 为零附近有一透射率尖峰，且相位也有一突变

$$T = \left| \frac{-i\Delta_1 + \frac{J^2}{-i\Delta_2 + \frac{\kappa_2}{2}}}{-i\Delta_1 + \frac{\kappa_1}{2} + \frac{J^2}{-i\Delta_2 + \frac{\kappa_2}{2}}} \right|^2,$$



Liu Y C , Li B B , Xiao Y F . Electromagnetically induced transparency in optical microcavities. *Nanophotonics*, 2017; 6(5): 789–811

EIT理论（光学体系）

考虑另一种对EIT的理论解释

引入两个算符 $\mathbf{b} = \frac{Ja_2 + \Omega_p^\dagger}{\Omega}$, $\mathbf{d} = \frac{J - \Omega_p a_2}{\Omega}$, 其中 $\Omega = \sqrt{J^2 + \Omega_p^2}$

可以将哈密顿量的相互作用项写成 $H_i = \Omega(a_1^\dagger b + b^\dagger a_1)$

只有 \mathbf{b} 对应的本征态参与相互作用, 称为亮态

而 \mathbf{d} 对应的本征态对 H_i 的本征值为零, 称为暗态

在假设耦合较强, 即 $J \gg \Omega_p$ 时, 可以看到, 亮态对应于第二个腔的模式, 暗态对应于无腔激发的模式, 由于暗态不参与相互作用, 则第一个腔难以被激发, 即无光吸收

EIT应用（无反转激光）

传统的产生激光的条件为原子的布居反转使辐射大于吸收。但是在EIT条件下，吸收被抑制。当较多原子处于较低能级时，仍有吸收小于辐射，可以产生激光。

考虑初始分布为

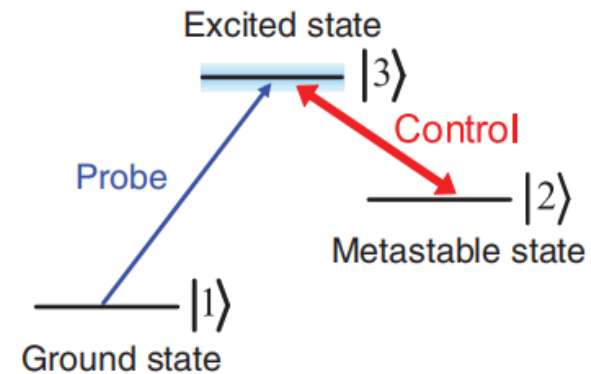
$$c_3(0) = 0, c_2(0) = \frac{e^{-i\phi}}{\sqrt{2}}, c_1(0) = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

假设输入频率无失谐，忽略损耗，且考虑输入信号的相位差，得演化方程为

$$\dot{c}_1 = -i|\Omega_p|e^{i\phi_1}c_3$$

$$\dot{c}_2 = -i|\Omega_c|e^{i\phi_2}c_3$$

$$\dot{c}_3 = -i|\Omega_c|e^{-i\phi_2}c_2 - i|\Omega_p|e^{-i\phi_1}c_1$$



Liu Y C , Li B B , Xiao Y F .
Electromagnetically induced
transparency in optical microcavities.
Nanophotonics,2017;6(5): 789–811

EIT应用（无反转激光）

$$\text{解出 } c_3(t) = \frac{i \sin \Omega t}{\sqrt{2} \Omega} (|\Omega_c| e^{-i(\phi_2 + \varphi)} + |\Omega_p| e^{-i\phi_1} c_1)$$

$$\text{其中 } |\Omega|^2 = |\Omega_p|^2 + |\Omega_c|^2$$

$$\text{假设 } |\Omega_c| = |\Omega_p| = |\Omega_0|$$

$$\text{则 } |c_3(t)|^2 = \frac{\sin^2 \Omega t}{2} (1 + \cos(\phi_2 + \varphi - \phi_1))$$

当 $\phi_2 + \varphi - \phi_1 = \pm\pi$ 时，原子不会被激发，此即为吸收抑制条件

EIT应用（无反转激光）

考虑一处于激发态的原子，初态为

$$c_3(0) = 1, c_2(0) = 0, c_1(0) = 0$$

解出

$$c_1(t) = -i \left| \frac{\Omega_p}{\Omega} \right| e^{i\phi_1} \sin(\Omega t)$$

$$c_2(t) = -i \left| \frac{\Omega_c}{\Omega} \right| e^{i\phi_2} \sin(\Omega t)$$

$$c_3(t) = \cos(\Omega t)$$

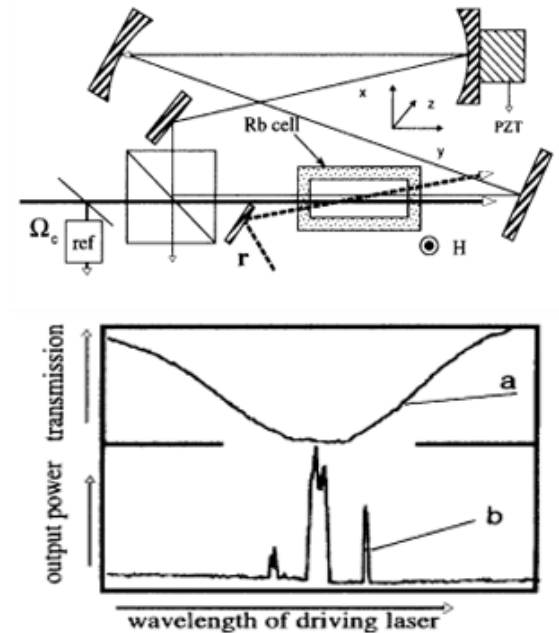
在 $\Omega t \ll 1$ 时，可得辐射概率为

$$p = |c_1|^2 + |c_2|^2 \approx \Omega^2 t^2 > 0$$

则只要有原子处于激发态，且输入光满足相干布居捕获条件，即使没有布居反转，也可以产生激光。

EIT应用（无反转激光）

1995年利用Rb原子体系，实验上实现了无反转激光，实验先利用调控光的失谐检验无布居反转，之后在腔中实现激光输出。



A. S. Zibrov, M. D. Lukin, D. E. Nikonov, L. Hollberg, M. O. Scully, V. L. Velichansky, and H. G. Robinson. Demonstration of Laser Oscillation without Population Inversion via Quantum Interference in Rb. Phys Rev Lett 1995:75, 1499

EIT应用（光延迟与光储存）

光在介质中传播的群速为

$$V_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c}{n + \omega \frac{dn}{d\omega}}$$

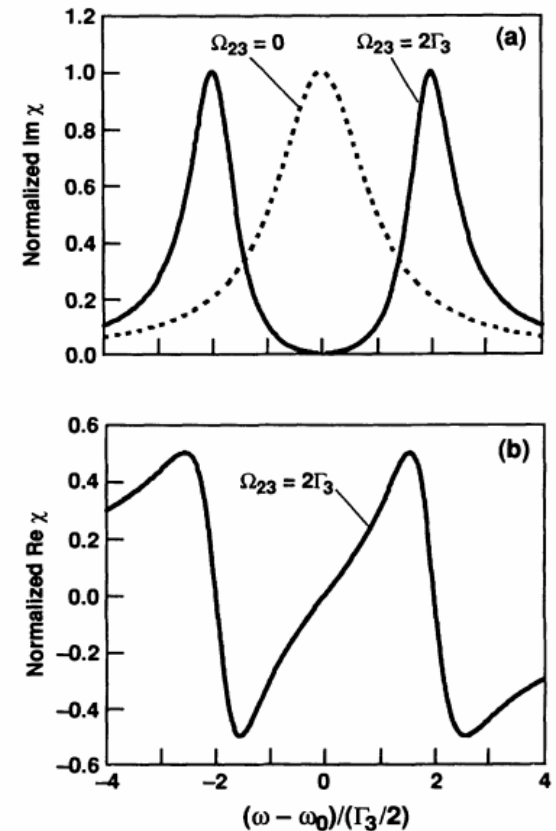
由折射率的曲线可以看出，在EIT附近的

$\frac{dn}{d\omega}$ 较大，群速降低，或者用亮暗态的图

像可认为光被暗态吸收再发射，因此可

利用EIT使光延迟，甚至将光的群速降低

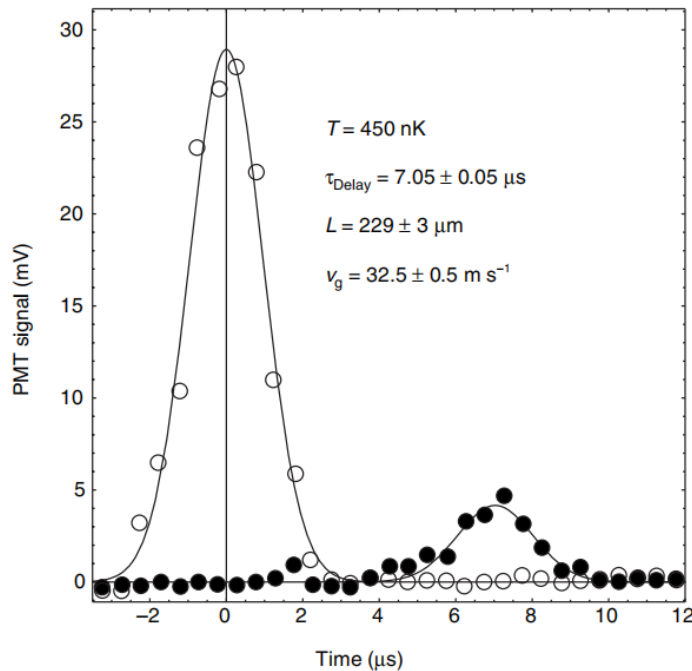
到零，即实现将光储存在暗态之中。



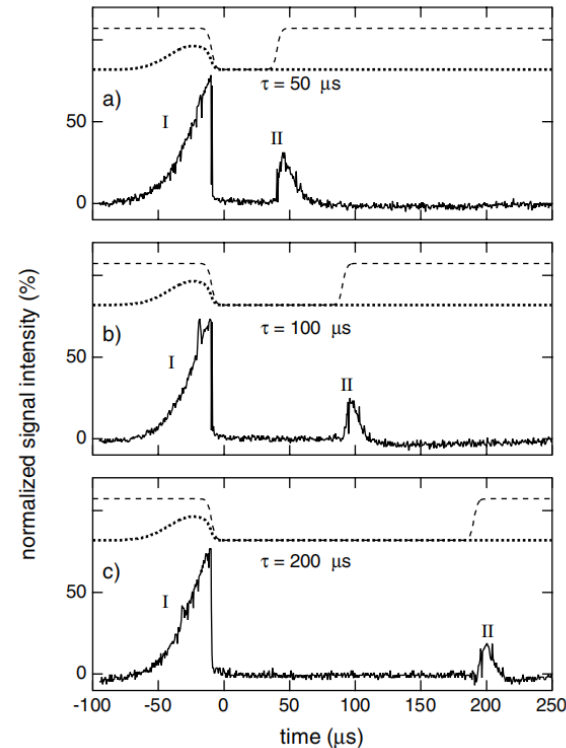
Harris SE, Field JE, Kasapi A. Dispersive properties of electromagnetically induced transparency. Phys. Rev. A **46**, R29(R)

EIT应用（光延迟与光储存）

具体计算可得 $V_g \approx \frac{\hbar c \epsilon_0 |\Omega_c|^2}{2 \omega_p |\mu_{13}|^2 N}$ ，可知提高原子数密度或共振频率能有效减小群速，1999年实现在超低温钠蒸汽中将群速降到32.5m/s，2001年在常温Rb蒸汽中实现超过200us的光储存。



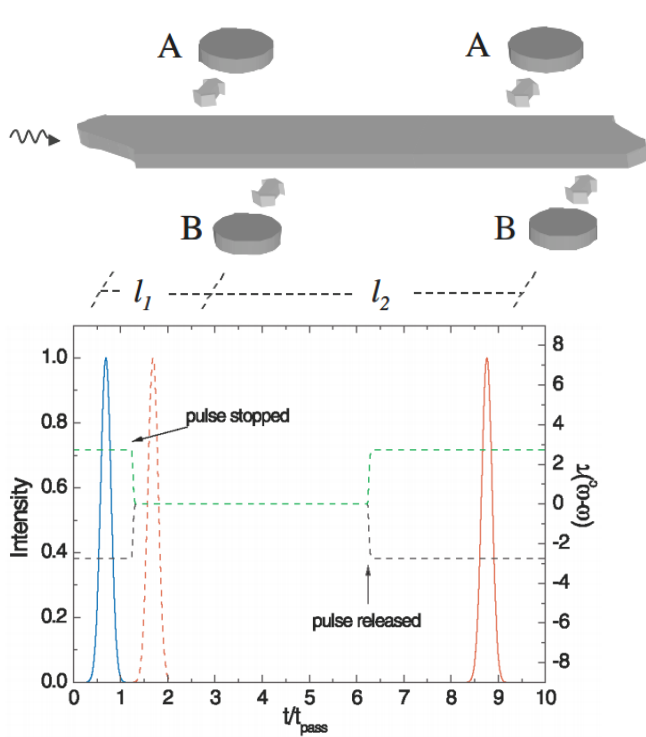
Hau LV, Harris SE, Dutton Z, Behroozi CH. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas. Nature 1999;397:594–8.



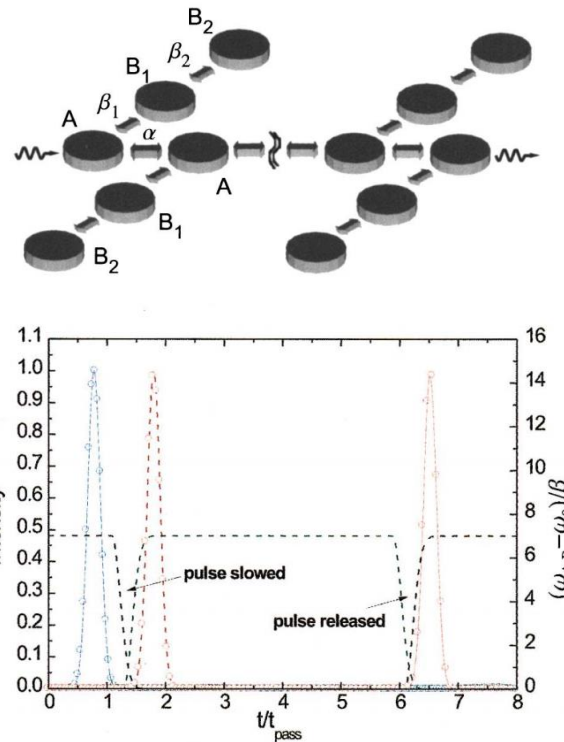
Phillips DF, Fleischhauer A, Mair A, Walsworth RL, Lukin MD. Storage of light in atomic vapor. Phys Rev Lett 2001;86:783.

EIT应用（光延迟与光储存）

在光学体系中同样实现了光的延迟与储存，并且能解决原子体系中的带宽问题，2011年已经实现将群速度降低至 40m/s^2 。



Yanik MF, Suh W, Wang Z, Fan S. Stopping light in a waveguide with an all-optical analog of electromagnetically induced transparency. Phys Rev Lett 2004;93:233903



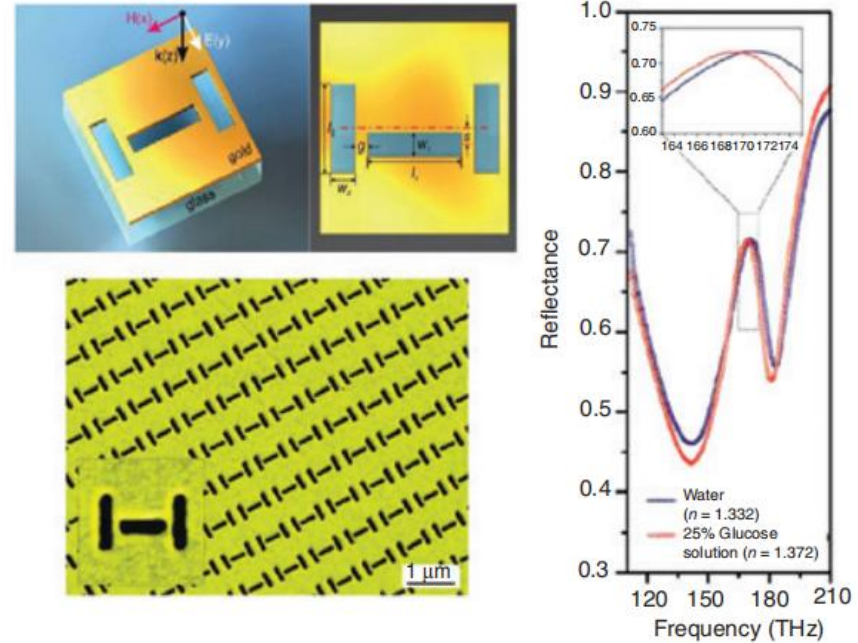
Yanik MF, Fan S. Stopping light all optically. Phys Rev Lett 2004;92:083901.

EIT应用（传感器）

EIT导致的透射率峰由于干涉而极其尖锐，如果利用峰的移动进行传感，将有较高灵敏度。

2010年，在表面等离激元体系中实现利用EIT探测环境折射率的变化。

随着元件和技术的改善，应用EIT原理的传感器被认为有潜力来利用极微小（与传统传感器相比）的平台，实现探测生物大分子或测定溶液浓度。



Liu N, Weiss T, Mesch M, et al. Planar metamaterial analogue of electromagnetically induced transparency for plasmonic sensing. *Nano Lett* 2010;10:1103.

参考文献

- [1] Harris SE, Field JE, Imamoglu A. Nonlinear optical processes using electromagnetically induced transparency. Phys Rev Lett 1990;64:1107.
- [2] Boller KJ, Imamoglu A, Harris SE. Observation of electromagnetically induced transparency. Phys Rev Lett 1991;66:2593.
- [3] Totsuka K, Kobayashi N, Tomita M. Slow light in coupled-resonator-induced transparency. Phys Rev Lett 2007;98:213904.
- [4] Liu Y C , Li B B , Xiao Y F . Electromagnetically induced transparency in optical microcavities. Nanophotonics, 2017;6(5): 789 - 811
- [5] Harris SE, Field JE, Kasapi A. Dispersive properties of electromagnetically induced transparency. Phys. Rev. A 46, R29(R)
- [6] A. S. Zibrov, M. D. Lukin, D. E. Nikonov, L. Hollberg, M. O. Scully, V. L. Velichansky, and H. G. Robinson. Demonstration of Laser Oscillation without Population Inversion via Quantum Interference in Rb . Phys Rev Lett 1995;75, 1499
- [7] Hau LV, Harris SE, Dutton Z, Behroozi CH. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas. Nature 1999;397:594 - 8.
- [8] Phillips DF, Fleischhauer A, Mair A, Walsworth RL, Lukin MD. Storage of light in atomic vapor. Phys Rev Lett 2001;86:783.
- [9] Yanik MF, Suh W, Wang Z, Fan S. Stopping light in a waveguide with an all-optical analog of electromagnetically induced transparency. Phys Rev Lett 2004;93:233903
- [10] Yanik MF, Fan S. Stopping light all optically. Phys Rev Lett 2004;92:083901.
- [11] Liu N, Weiss T, Mesch M, et al. Planar metamaterial analogue of electromagnetically induced transparency for plasmonic sensing. Nano Lett 2010;10:1103.
- [12] Gardiner, CW, Parkins AS, Zoller P. Wave-function quantum stochastic differential equations and quantum-jump simulation methods. Phys Rev A 1992;46:4363.
- [13] Dalibard J, Castin Y, Molmer K. Wave-function approach to dissipative processes in quantum optics. Phys Rev Lett 1992;68:580.

谢谢大家