

由相干制备原子系统构成的理想光学介质*

肖敏^{1,2,†} 王海²

(1 阿肯色大学物理系 费耶特维尔 阿肯色 72701 美国)

(2 山西大学光电研究所 量子光学与光量子器件国家重点实验室 太原 030006)

摘要 电磁感应透明 (electromagnetically induced transparency, EIT) 发生时所伴随的效应 (如可控的线性吸收和色散, 可控的非线性增强) 是理想光学介质所必需的重要特性。通过理解这种相干制备的多能级原子系统的线性和非线性特征, 人们能够更好地设计和利用这种新颖的光学介质, 并将其应用到光通信和量子信息处理中。文章简单介绍了与 EIT 有关的原子介质的基本 (线性和非线性) 光学特性, 并简单评价了几个令人感兴趣的应用。

关键词 原子相干性, 电磁感应透明, 多能级原子系统, 非线性光学效应, 光学腔

Ideal optical media via coherently-prepared atomic systems

XIAO Min^{1,2,†} WANG Hai²

(1 Department of Physics, University of Arkansas, Fayetteville, Arkansas 72701, USA)

(2 The State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shansi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract Effects related to electromagnetically induced transparency (EIT), such as controllable linear absorption and dispersion, as well as enhanced nonlinearity, provide many unique properties for ideal optical media. By understanding the fundamental linear and nonlinear optical properties of such coherently-prepared multi-level atomic systems, one can design and make use of the novel properties for various applications in optical communication and quantum information processing. In this short review we will only present the very basic (linear and nonlinear) optical properties of EIT-related atomic media, and briefly mention a few interesting applications.

Keywords atomic coherence, electromagnetically induced transparency, multi-level atomic systems, nonlinear optical effect, optical cavity

1 引言

一个理想的非线性光学材料应在一个所需的光波长上具有非常大的非线性光学折射率、低的线性吸收和显著的或可控制的色散特性。通常的非线性光学材料, 如非线性晶体、半导体介质或两能级原子系统是很难同时满足上述要求的。典型的强非线性效应一般发生在近共振条件下, 但其总是伴随着介质的强烈吸收, 因此难以进行应用。然而, 最近发展的相干制备的多能级原子或称为电磁感应透明 (electromagnetically induced transparency, EIT) 的系

统^[1-3]可以形成理想的光学介质。典型的 EIT 效应发生在三能级 Λ 型原子 (由一个激发态和两个基态组成, 两基态的退相干速率很小) 介质中, 当两束光分别调谐到原子的两个跃迁频率上并发生相互作用时, 原子两基态就会建立相干性。由于两基态之间的量子干涉效应, 原子被俘获在基态上, 难以向高能级跃迁, 形成所谓“暗态”^[1]。这样就导致了原子介

* 国家自然科学基金 (批准号: 10640420195) 资助项目, 美国自然科学基金资助项目

2007-04-29 收到初稿, 2007-06-18 收到修改稿

† 通讯联系人。Email: mxiao@uark.edu

质对探针光线性吸收锐减和色散剧增的效应,即发生电磁感应透明(EIT)现象。EIT发生时,介质能够在近共振处极大地增强 Kerr 非线性效应,且线性吸收极大地降低^[4-9]。此外,在近 EIT 共振处色散特性变为非常锐利的色散下降沿^[10],这一特性使得探针光能以极慢的速度穿过 EIT 介质^[11]。这种慢速穿过介质的激光将进一步增加其与原子的相互作用时间,同时为两激光脉冲的匹配提供了一个较好的条件^[7],因此可用以实现高效的非线性光学过程,如四波混频(FWM)^[6,7,12-14]、谐波产生^[4,5]、原子系统中的可控光学双稳^[15]。另外,在相干制备的多能级 EIT 原子系统中,人们实现了光子存储与记忆^[16,17],产生了关联光子对^[18-20]。

本文将对 EIT 改变线性和非线性光学特性的基本理论、背景作一简要回顾,并介绍一些在三能级和四能级原子系统中演示的有关这种新颖效应的实验。我们主要讨论 EIT 介质的线性和非线性特性,也对几个在这种理想光学介质中增强的非线性效应作简单介绍。

2 EIT 对介质线性光学特性的改变

众所周知,当一束探针光的频率被调谐到两能级原子共振跃迁频率处时,原子在中心频率处具有极大的吸收并伴随着反常色散的发生。然而,对于如图 1(a)所示的三能级原子系统,当再加一束强的耦合光与原子的另一跃迁能级(由|3>到|2>)作用时,由于双光子跃迁,使得原子的|1>和|3>能级产生原子相干性,原子被俘获在|1>和|3>的叠加态上,难以向高能级跃迁,形成“暗态”。结果导致原子对探针光线性吸收锐减,色散剧增。理论研究表明,探针光的线性极化率可表示为^[2]:

$$\chi^{(1)} = \frac{2Nd_{21}\rho_{21}^{(1)}}{\epsilon_0 E_p} \approx \frac{iN|d_{21}|^2}{\epsilon_0 \hbar} \times \left(\frac{1}{\gamma - i\Delta_p + \frac{|\Omega_c|^2/4}{\gamma_{31} - i(\Delta_p - \Delta_c)}} \right), \quad (1)$$

对于三能级梯形结构的原子(如图 1(b)所示),需对(1)式做一个小的修正,即用 $(\Delta_p + \Delta_c)$ 代替(1)式分母中的 $(\Delta_p - \Delta_c)$,这对于在两个不同系统(梯形和 Λ 型结构)中演示双光子消多普勒展宽的 EIT 效应是非常重要的^[2,3]。

探针光线性极化率的虚部和实部分别对应着吸收系数 $\alpha = \frac{\omega_p n_0}{c} \text{Im}\chi^{(1)}$ 和色散系数 $\beta = \frac{\omega_p n_0}{2c}$

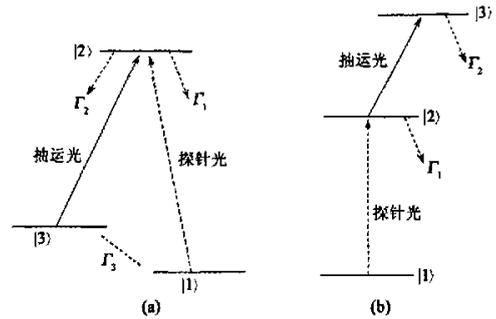


图 1 实现 EIT 的三能级(a) Λ 型和(b)梯型原子结构

$\text{Re}\chi^{(1)}$ 。对于一个由热原子介质与连续的耦合光场及探针光场作用的系统,多普勒效应是一个主要影响因素,因而必须被考虑。多普勒效应的引入就是将探针光或耦合光频率增加一个频移量 $\pm \omega_{p,c} v/c$ 。正负号取决于探针光和耦合光的传播方向^[2]。如果探针光和耦合光同向传播通过 Λ 型三能级原子系统,同时 ω_{21} 接近于 ω_{23} ^[2],则双光子失谐 $(\Delta_p - \Delta_c)$ 中的多普勒频移可被消除。如果探针光和耦合光反向传播通过一个梯型三能级原子系统^[2],则双光子失谐 $(\Delta_p + \Delta_c)$ 中的多普勒频移可被消除。

2.1 吸收降低

在原子蒸汽中,若想使用相对弱的激光来观察 EIT 效应,必须使系统满足双光子消多普勒效应这一条件。早期的 EIT 实验是 Harris 小组用强度非常高的脉冲激光完成的,通过功率加宽,他们克服了热原子蒸汽中的多普勒影响,并获得了一个非常宽的 EIT 窗口。用相对弱的连续激光在原子蒸汽中完成的第一个 EIT 实验是在双光子消多普勒效应系统中进行的。对一个 Λ 型三能级原子系统,只需将探针和耦合光同向穿过原子蒸汽,就可产生一个清晰的 EIT 信号(图 2)。实验中, Λ 型三能级系统是由⁸⁷Rb 原子中的 D1 线能级构成的,测量得到的窄 EIT 窗口中心的吸收降低超过了 90%^[3]。使用冷原子介质和线宽压窄的激光器,可获得一个非常窄的几乎完全透明的 EIT 窗口。

在一个梯型原子系统中(图 1(b)),双光子消多普勒效应的系统可通过探针光和耦合光反向传播通过原子蒸汽获得。通过选择合适的超精细能级和光的偏振,可得到一个理想的三能级原子系统。实验测得的 EIT 结果和理论上通过包含多普勒速度分布的积分计算结果在不同的耦合频率失谐处都能很好地符合(详见文献[2])。这一工作首先将理论和实验进行了定量比较,并提供了一个理解三能级相

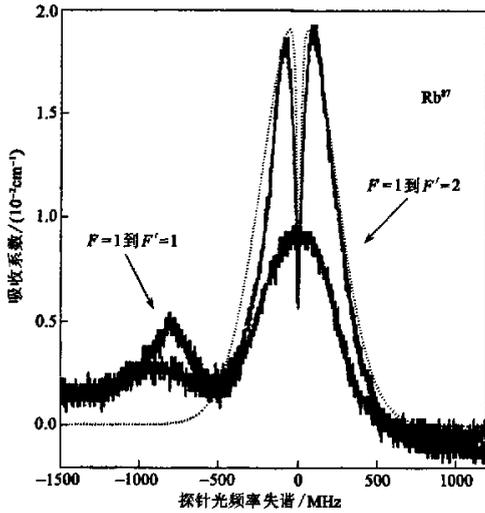


图2 在Λ型三能级原子系统中测得的EIT信号(较低的信号为挡掉耦合光时得到的吸收信号,虚线是用实验参数理论计算得到的结果,而实线是实验得到的EIT曲线)^[2]

干原子介质物理机制的很好途径。通过使用连续半导体激光及原子蒸汽中双光子消多普勒配置所实现的EIT现象,为以后这一领域的发展提供了一个简单、可行的平台。当耦合光变得非常弱时(其拉比频率小于探针光作用能级的自发辐射速率),直接的量子干涉现象能够被实验观测到^[21]。

2.2 色散增强效应

根据Kramers-Kronig关系式,我们知道吸收谱尖锐的EIT窗口对应着介质强烈的正色散,这与普通二能级原子吸收过程所对应的反常色散情况大不相同。图3(b)中的下图为在三能级EIT介质中首次直接测量到的色散曲线,并由此可以推断出探针光的群速度可降低13倍^[10]。这一强烈正色散区与由EIT导致的吸收锐减区出现在同一频率区域。利用这样的透明窗口,以及其中几乎为线性的色散特性,可以无吸收和无形变地降低探针光脉冲的群速度,其群速度公式为

$$v_g = \left(\frac{d\omega}{dk}\right)_0 = \frac{c}{n_0 + \omega_p (dn/d\omega_p)}_0 \quad (2)$$

其中 $n_0 \approx 1$ 是真空折射率。当折射率的变化率为正且很大时(正色散),例如如图3(b)中的下图所示的EIT介质,探针光的群速度将被大大降低。色散的线性区域(取决于EIT窗口宽度)决定频率宽度,即探针光脉冲的长度,当探针光脉冲频率展宽在EIT窗口宽度之内时,脉冲形状将不发生改变。

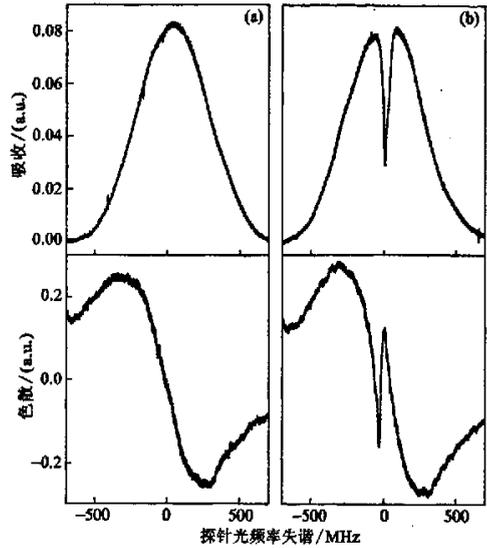


图3 EIT介质的吸收和色散曲线 (a)没有耦合光时介质的吸收(上图)和色散(下图)曲线;(b)发生EIT效应时,介质的吸收(上图)和色散(下图)曲线。摘自文献[10]

3 由原子相干增强的Kerr非线性折射率

在多能级原子系统中,原子相干效应不但可以改变其线性吸收和色散特性,而且可以强烈地改变原子系统的非线性光学特性。由于原子气体是中心对称的,最低阶的非线性效应反映在三阶项上,即Kerr非线性。

一个新颖的技术可以被用来直接测量自Kerr非线性折射率。这就是使用光学环形腔扫描方法,通过观察腔透射曲线的非对称度来测量介质的自Kerr非线性折射率^[9]。将非线性介质放置于环形腔中,介质导致的环形腔总相移为

$$\delta = \frac{\omega_p L}{c} + \frac{(n_0 - 1)\omega_p l}{c} + \frac{\omega_p l}{c} n_2 I_p - 2\pi m \quad (3)$$

其中 L 表示腔长, l 是铷原子汽室长度, m 是整数。如果总的相移是线性的(即不依赖于腔内的光强),则腔的透射是对称的洛仑兹形曲线。但是由于总相移中的非线性项(正比于腔内的光场强度 I_p)使透射曲线成为非对称型,这是由于腔的透射曲线本身依赖于总的相移。透射曲线的不对称度决定于Kerr非线性折射率 n_2 。通过测量腔的透射曲线的非对称度,可以直接确定Kerr非线性折射率 n_2 。实验中采用了⁸⁷Rb原子构成的Λ型三能级结构(同用于演示EIT效应的能级结构一样)和环形腔。探针光(也就

是腔场)和耦合光(不在环行腔中循环)同方向传播通过原子汽室,形成双光子消多普勒结构。实验上测得的三能级原子系统的非线性折射率 n_2 随探针光频率失谐 Δ_p 变化的关系如图 4 所示^[8]。容易看出,同二能级系统(将耦合光挡住)相比,三能级原子 Kerr 非线性折射率在 EIT 共振附近变化是显著的,并且其正负值依赖于 Δ_p 。 n_2 对其他的实验参数,比如对 Δ_c 和耦合光强度的依赖关系也被进行了测量,同样表明 EIT 对 n_2 有明显的影响^[22]。另外,采用同样的技术,人们对 EIT 介质的交叉 Kerr 非线性系数也进行了测量^[23]。

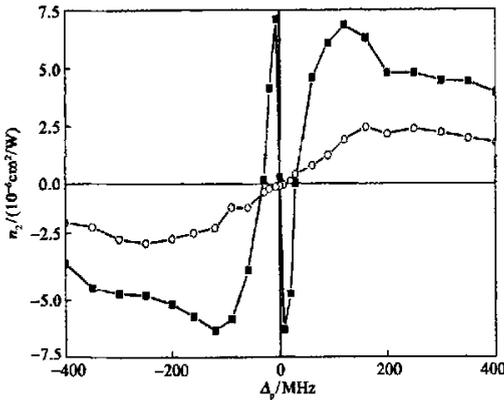


图 4 EIT 介质中的 Kerr 非线性系数 n_2 随探针光频率失谐的变化关系(■为有耦合光发生 EIT 效应时的测量结果;○为没有耦合光时的测量结果)^[8]

使用这种相干制备的理想光学介质,可使线性和非线性折射率对不同实验参量存在一个敏感的依赖关系,这对于有效控制不同的线性和非线性光学过程非常有用。比如通过改变耦合光大约 20MHz 的频率失谐,Kerr 非线性折射率可从正值到负值改变一个多数量级(详细讨论见文献[22])。

4 EIT 导致的线性和非线性光学性质变化的应用

十五年以来,与 EIT 有关的领域研究一直非常活跃,通过利用多能级 EIT 效应导致的线性(吸收和色散)和非线性光学特性的变化,人们已经完成了许多有意义的工作。这里我们并不打算回顾所有这些工作,而只是简单地介绍几个应用 EIT 效应改变介质光学性质的研究方向。

4.1 光脉冲的减速

EIT 最显著的应用之一是减低光脉冲的群速度。如图 3(b) 下图所示,在 EIT 介质中,探针光的色散斜率变得相当陡峭,由(2)式可知其群速度会被极大地减小。将探针光脉冲减速到几米/秒的实验首先在冷原子中实现^[11],随后,这一现象在其他多能级原子和固体系统中也被演示^[24]。探针光的速度能通过改变耦合光的强度和频率失谐来控制。更有趣的是,通过利用强色散导致的光减速及缀饰态原子系综和场相互耦合导致的原子相干等性质,在三能级 EIT 系统中能形成暗态激子,其作为光子的存储记忆元件,已经被用在原子介质中储存和释放光信息^[16,17]。当如此高度色散的 EIT 介质被放进光学腔内的时候,内腔中有效的光子寿命会增加(由于传播速度减慢),因而导致腔线宽被压窄^[25],这一特性可用来改进腔内光场衰荡光谱^[26]。

降低光脉冲的群速需要很陡的色散变化,这就要求有一个非常窄的 EIT 窗口。这种窄的 EIT 窗口会限制探针光脉冲的频率带宽,因此短探针光脉冲通过 EIT 介质将会变形。这一因素限制了将此降低光速的方法用于全光通信网络中的光延迟上,研究人员正在为克服这种带宽-时间延迟的限制而努力。

4.2 相关联光子对的产生

近期,另一活跃的研究领域是在三能级 EIT 系综中产生关联光子对。首先将所有原子制备在三能级一个基态上(例如图 1(a)中的能级 |1>),一束“写”控制光作用于原子,使某个原子从 |1>通过拉曼过程跃迁到能级 |3>上,并产生一个“Stokes”光子。然后另一束“读”控制光与原子作用,使其从能级 |3>跃迁回到能级 |1>,并产生一个“反 Stokes”光子。这种方式产生的“Stokes”光子和“反 Stokes”光子具有量子关联特性^[18,19]。另外,这种关联光子对近来在一个四能级冷原子系统中被获得^[20]。这些量子关联光子对可作为纠缠源在量子信息存储和量子网络中得到应用^[27,28]。

4.3 增强弱光非线性过程

正如前面所描述的,三阶非线性增强的原因来自多能级原子系统中产生的原子相干性。由于在 EIT 共振附近,非线性效应得到极大的增强,而吸收则显著地减小,因此在共振处产生的光信号能无吸收地透过。另一个重要的作用是,在 EIT 介质中,由

于激光传播速度减小,从而增加了光束之间的有效作用时间。这些效应可增强许多非线性过程。此外,强烈的色散也有助于实现四波混频过程中的相位匹配。EIT 介质还可在许多别的非线性光学中得到应用。受篇幅限制,下面我们仅介绍很少几个在多能级 EIT 介质中利用原子相干效应增强非线性光学过程的例子。

其中之一是在三能级 Λ 型^[6,7]或四能级双 Λ 型^[12]原子系统中的增强四波混频(FWM)效应。当两个强的抽运激光(k_1 和 k_2)被调谐到 Λ 型系统的相应跃迁能级时^[6],另一个弱的探针光 k_p 将产生一个可满足相位匹配条件 $k_1 + k_2 + k_p + k_s = 0$ 的信号光 k_s ,最大的信号光产生在 EIT 窗口处。在一个四能级双 Λ 系统中,产生的非简并四波混频信号在抽运光强度与原子相干性具有合适的匹配情况下达到最大^[12]。在早期的四波混频效应实验以后,许多新的四波混频和高阶混频效应在最近的十年中不断被实验所演示,尤其是在冷原子中,这些多波混频现象也被演示^[14,29]。

另一个有趣的实验系统是将 EIT 原子放入光学腔中,研究原子-腔相互作用及介质线性和非线性光学特性的变化。利用增强的 Kerr 非线性效应,并通过改变频率失谐^[30]或强度^[31],可以实现用全光学方法来控制一束光的强度变化,这种全光控制对于光通信和量子信息处理是非常有用的。

二能级原子加光学腔形成的双稳一般被分为两类,即吸收性双稳和色散性双稳^[32]。吸收性双稳发生的条件是激光被调谐到原子跃迁共振处,因此,饱和和吸收是促使双稳发生的机制。色散性双稳发生的条件是激光被调谐到远离原子共振处,这时非线性折射率是促使光学双稳发生的机制。在光学腔中,使用三能级 EIT 介质代替二能级介质,则腔内吸收、色散和非线性折射率都能被极大地改变,光学双稳也同样能发生并能被很好地控制^[15]。在三能级原子系统中,双光子消多普勒效应使得使用热原子可替代二能级原子所需要的原子束和冷原子。最近的实验表明,使用腔加 EIT 介质,可以控制并改变光学双稳的阈值、迟滞曲线的形状^[15]和旋转方向^[33]。通过简单地调节耦合光束的参量,双稳态曲线能变为吸收和色散特性混合的多稳态^[34]。此外,光学非稳^[35],从倍周期分叉到混沌^[36]以及随机共振^[37]等现象在环形腔三能级原子系统中都已被观察到。其中从倍周期分叉到混沌以及随机共振在两能级原子系统中以前从未被观察到。另外,用 EIT 原子光学

双稳系统做记忆元件的实验也已被成功地演示^[38]。

5 总结与展望

本文着重介绍了相干原子介质的一些线性和非线性光学特性以及它们的应用。这是一个充满活力的研究领域,各种不同的应用方案不断被世界各地的研究小组提出并演示。例如,关联或纠缠光子对的产生,构建光量子器件(量子相位门、原子波片等),用于量子信息处理和量子网络的单光子存储,量子缓存器等。另外原子相干导致的介质的更高阶非线性效应也已被实验实现。

事实上,这种相干制备的 EIT 介质不仅仅限于原子系统。许多由 EIT 导致的吸收减弱,群速度减慢以及非线性折射率增强等效应已经在各种不同的固体介质中观察到,例如光学晶体、掺杂离子的玻璃样品、半导体材料、光纤等。这些相干制备的固体介质将进一步推动光量子器件走向实用化,实现构建全光通信和量子信息处理所需的光电器件。可以预见,相干介质的可控线性和非线性光学特性,必将在不同光学领域中导致许多令人激动的应用。

参考文献

- [1] Harris S E. *Phys. Today*, 1997, 50:7; Boller K L, Imamoglu A, Harris S E. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, 66: 2593; Field J E, Hahn K H, Harris S E. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, 6: 3062
- [2] Cea-Banacloche J, Li Y, Jin S *et al.* *Phys. Rev.*, 1995, A51: 576
- [3] Li Y, Xiao M. *Phys. Rev.*, 1995, A51: R2703
- [4] Hakuta K, Marnett L, Stoicheff B P. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, 66:595
- [5] Jain M, Xia H, Yin GY *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1996,77: 4326
- [6] Li Y, Xiao M. *Opt. Lett.*, 1996, 21: 1064
- [7] Braje D A, Balic V, Yin GY *et al.* *Phys. Rev. A*, 2003,68: 041801(R)
- [8] Wang H, Goorskey D, Xiao M. *Phys. Rev. Lett.*, 2001,87: 073601
- [9] Kang H, Zhu Y. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 91: 093601
- [10] Xiao M, Li Y, Jin S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1995,74: 666
- [11] Hau L V, Harris S E, Dutton Z *et al.* *Nature (London)*, 1999,397:594
- [12] Lu B, Burkett W H, Xiao M. *Opt. Lett.*, 1998,23:804
- [13] Hemmer P R, Katz D P, Donoghue J *et al.* *Opt. Lett.*, 1995, 20:982
- [14] Kang H, Hernandez G, Zhu Y. *Phys. Rev. A*, 2004, 70: 061804 (R)
- [15] Joshi A, Brown A, Wang H *et al.* *Phys. Rev. A*, 2003, 67: 041801(R)
- [16] Liu C, Dutton Z, Behroozi C H *et al.* *Nature*, 2001, 409:490
- [17] Phillips D F, Fleischhauer A, Mair A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2001,86:783

- [18] Kuzmich A, Bowen W P, Boozer A D *et al.* Nature, 2003, 423; 731
- [19] Wal C H van der, Eisaman M D, Andre A *et al.* Science, (2003, 301; 196
- [20] Balic V, Braje D A, Kolchin P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 94; 183601
- [21] Li Y, Xiao M. Phys. Rev. A, 1995, 51; 4959
- [22] Wang H, Coorskey D, Xiao M. Opt. Lett., 2002, 27; 258
- [23] Chang H, Du Y, Yuo J *et al.* Europhysics Lett., 2004, 65; 485
- [24] Boyd R W, Gauthier D J. Progress in Optics. Ed. Wolf E 2002, 43; 497
- [25] Wang H, Goorskey D J, Burkett W H *et al.* Opt. Lett., 2000, 25; 1732
- [26] Yang W, Joshi A, Xiao M. Opt. Lett., 2004, 29; 2133
- [27] Matsukevich D N, Chameliere T, Jenkins S D *et al.* Phys. Rev. Lett., 2006, 96; 030405
- [28] Chou C W, de Riedmatten H, Felinto D *et al.* Nature, 2005, 438; 828
- [29] Braje DA, Balic V, Goda S *et al.* Phys. Rev. Lett., 2004, 93; 183601
- [30] Wang H, Goorskey D, Xiao M. Phys. Rev. A, 2002, 65; 051802 (R)
- [31] Wang H, Coorskey D, Xiao M. Opt. Lett., 2002, 27; 1354
- [32] Boyd R W. Nonlinear Optics (Second Edition). Boston: Academic Press, 2003
- [33] Joshi A, Yang W, Xiao M. Phys. Rev. A, 2004, 70; 041802 (R)
- [34] Joshi A, Xiao M. Phys. Rev. Lett., 2003, 91; 143904
- [35] Wang H, Coorskey D, Xiao M. Phys. Rev. A, 2002, 65; 011801 (R); Yang W, Joshi A, Xiao M. Phys. Rev. A, 2004, 70; 033807
- [36] Yang W, Joshi A, Xiao M. Phys. Rev. Lett., 2005, 95; 093902
- [37] Joshi A, Xiao M. Phys. Rev. A, 2006, 74; 013817
- [38] Chang H, Wu H, Xie C *et al.* Phys. Rev. Lett., 2004, 93; 213901

• 书评和书讯 •

科学出版社物理类新书推荐

书名	作(译)者	定价	出版日期
半导体的检测与分析(第二版)	许振嘉	98.00	2007年8月
薄膜结构X射线表征	麦振洪等	40.00	2007年7月
电磁波达论	盛新庆	38.00	2007年7月
大气声学	杨训仁、陈宇	52.00	2007年6月
d波超导体	向涛	48.00	2007年5月
场论中的路径积分导引(影印)	U. Mosel	45.00	2007年4月
表面物理原理(影印)	F. Bechstedt	58.00	2007年4月
半导体光学(第三版)(影印)	C. F. Klingshirn	118.00	2007年4月
自组织纳米材料(影印)	Motonari Adachi, D. J. Lockwood	56.00	2007年4月
远程通信中的非线性光学(影印)	T. Schneider	68.00	2007年4月
物理学中的拓扑和几何(影印)	E. Bick, F. D. Steffen	65.00	2007年4月
量子光学——降噪、囚禁离子、量子路径和退相干(影印)	M. Orszag	58.00	2007年4月
光学与激光——光纤与光波导(第五版)(影印)	M. Young	79.00	2007年4月
飞秒激光脉冲——原理及实验(第二版)(影印)	C. Rulliere	68.00	2007年4月
薄膜材料-应力、缺陷的形成和表面演化	卢磊	86.00	2007年1月
亚稳金属材料	胡壮麒	160.00	2006年12月
高等原子分子物理学(第二版)	徐克尊	54.00	2006年9月
半导体异质结构物理(第二版)	虞丽生	52.00	2006年5月
实验物理中的概率和统计(第二版)	朱永生	72.00	2006年3月
物理学中的群论(第二版)	马中骥	68.00	2006年2月
相互作用的规范理论(第二版)	戴元本	68.00	2005年6月

凡购书者免邮费,请按以下方式联系我们:

电话:010-64017957 64033515

电子信箱: mlhukai@yahoo.com.cn yandeping@espg.net

通讯地址:北京东黄城根北街16号,科学出版社100717

联系人:胡凯 鄢德平

主页: <http://www.sciencep.com>

由相干制备原子系统构成的理想光学介质

作者: [肖敏](#), [王海](#), [XIAO Min](#), [WANG Hai](#)
作者单位: [肖敏, XIAO Min \(阿肯色大学物理系, 费耶特维尔, 阿肯色, 72701, 美国; 山西大学光电研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原, 030006\)](#), [王海, WANG Hai \(山西大学光电研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原, 030006\)](#)
刊名: [物理](#) **ISTIC** **PKU**
英文刊名: [PHYSICS](#)
年, 卷(期): 2007, 36(9)

参考文献(41条)

1. [Harris S E](#) [查看详情](#) 1997
2. [Boller K L](#); [Imamoglu A](#); [Harris S E](#) [查看详情](#) 1991
3. [Field J E](#); [Hahn K H](#); [Harris S E](#) [查看详情](#) 1991
4. [Gea-Banacloche J](#); [Li Y](#); [Jin S](#) [查看详情](#) 1995
5. [Li Y](#); [Xiao M](#) [查看详情](#) [外文期刊] 1995
6. [Hakuta K](#); [Marmet L](#); [Stoicheff B P](#) [查看详情](#) 1991
7. [Jain M](#); [Xia H](#); [Yin GY](#) [查看详情](#) 1996
8. [Li Y](#); [Xiao M](#) [查看详情](#) 1996
9. [Braje D A](#); [Balic V](#); [Yin GY](#) [查看详情](#) 2003
10. [Wang H](#); [Goorskey D](#); [Xiao M](#) [查看详情](#) 2001
11. [Kang H](#); [Zhu Y](#) [查看详情](#) 2003
12. [Xiao M](#); [Li Y](#); [Jin S](#) [查看详情](#) [外文期刊] 1995
13. [Hau L V](#); [Harris S E](#); [Dutton Z](#) [查看详情](#) 1999
14. [Lu B](#); [Burkett W H](#); [Xiao M](#) [Nondegenerate four-wave mixing in a double-Lambda system under the influence of coherent population trapping](#) [外文期刊] 1998(10)
15. [Hemmer P R](#); [Katz D P](#); [Donoghue J](#) [查看详情](#) [外文期刊] 1995
16. [Kang H](#); [Hernandez G](#); [Zhu Y](#) [查看详情](#) 2004
17. [Joshi A](#); [Brown A](#); [Wang H](#) [查看详情](#) 2003
18. [Liu C](#); [Dutton Z](#); [Behroozi C H](#) [查看详情](#) 2001
19. [Phillips D F](#); [Fleischhauer A](#); [Mair A](#) [查看详情](#) 2001
20. [Kuzmich A](#); [Bowen W P](#); [Boozer A D](#) [Generation of nonclassical photon pairs for scalable quantum communication with atomic ensembles](#) [外文期刊] 2003(6941)
21. [Wal C H van der](#); [Eisaman M D](#); [Andre A](#) [查看详情](#) 2003
22. [Balic V](#); [Braje D A](#); [Kolchin P](#) [查看详情](#) 2005
23. [Li Y](#); [Xiao M](#) [查看详情](#) [外文期刊] 1995
24. [Wang H](#); [Goorskey D](#); [Xiao M](#) [查看详情](#) 2002
25. [Chang H](#); [Du Y](#); [Yao J](#) [查看详情](#) 2004
26. [Boyd R W](#); [Gauthier D J](#); [Wolf E](#) [Progress in Optics](#) 2002
27. [Wang H](#); [Goorskey D J](#); [Burkett W H](#) [查看详情](#) 2000
28. [Yang W](#); [Joshi A](#); [Xiao M](#) [查看详情](#) 2004

29. [Matsukevich D N;Chaneliere T;Jenkins S D 查看详情](#)[外文期刊] 2006
30. [Chou C W;de Riedmatten H;Felinto D Measurement-induced entanglement for excitation stored in remote atomic ensembles](#)[外文期刊] 2005(7069)
31. [Braje DA;Balic V;Goda S 查看详情](#)[外文期刊] 2004
32. [Wang H;Goorskey D;Xiao M 查看详情](#) 2002
33. [Wang H;Goorskey D;Xiao M 查看详情](#) 2002
34. [Boyd R W Nonlinear Optics](#) 2003
35. [Joshi A;Yang W;Xiao M 查看详情](#) 2004
36. [Joshi A;Xiao M 查看详情](#) 2003
37. [Wang H;Goorskey D;Xiao M 查看详情](#) 2002
38. [Yang W;Joshi A;Xiao M 查看详情](#) 2004
39. [Yang W;Joshi A;Xiao M 查看详情](#)[外文期刊] 2005
40. [Joshi A;Xiao M 查看详情](#) 2006
41. [Chang H;Wu H;Xie C 查看详情](#) 2004

引用本文格式: [肖敏](#). [王海](#). [XIAO Min](#). [WANG Hai](#) [由相干制备原子系统构成的理想光学介质](#)[期刊论文]-[物理](#) 2007(9)