

基于量子存储机制实现光学信息卷积操作的研究

李志向, 刘建基, 范洪鸣, 张国权

南开大学物理科学学院弱光非线性光子学教育部重点实验室, 天津 300071

摘要 提出了一种利用量子存储机制进行相干光学信息处理的技术, 在 4f 成像系统的像面上可以实现信号光和读取光之间的卷积运算。实验证明了通过基于电磁感应透明(EIT)效应的光脉冲存储和读取过程实现光学信息卷积操作的可行性。该研究结果为基于量子存储机制进行相干光学信息处理提供了理论和实验依据。

关键词 光信号处理; 相干光学信息处理; 电磁感应透明; 量子存储

中图分类号 O438.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0207003

Study on Convolution Operation of Optical Information via Quantum Storage

Li Zhixiang, Liu Jianji, Fan Hongming, Zhang Guoquan

*The Key Laboratory of Weak Light Nonlinear Photonics, Ministry of Education, School of Physics,
Nankai University, Tianjin 300071, China*

Abstract A coherent optical information processing method based on quantum storage is proposed, and the convolution operation between signal light and readout light can be realized on the image plane of the 4f-imaging system. The experiment confirms the feasibility of realizing convolution operation by means of light pulse storage and readout process based on the effect of electromagnetically induced transparency (EIT). The result here provides the theoretical and experimental basis for the coherent optical information processing based on quantum storage.

Key words signal processing; coherent optical information processing; electromagnetically induced transparency; quantum storage

OCIS codes 070.4340; 070.1170; 270.1670

1 引 言

自 20 世纪 60 年代激光器问世以来, 光学信息处理^[1]得到了迅猛发展并获得了广泛的应用。光学信息处理是基于光学频谱分析和傅里叶变换技术、通过空域或频域调制用纯光学的方法实现信息的处理。卷积是光学信息处理中最常用的运算和处理技术之一, 它描述了光学系统的输入信息和输出信息在空间域的变换特性, 如实际的光学成像可以看成是几何光学理想像和光学成像系统脉冲响应函数的卷积。在相干光学信息处理中, 卷积运算可以通过两次傅里叶变换和空间频率域乘法运算实现, 其中空间频率域乘法运算是通过在频谱面上放置所需的滤波器来实现的。在焦平面上放置特定的空间滤波器可以实现不同的应用, 如使用光栅型滤波器可以实现两个图像的减法^[2], 通过判断匹配滤波相关识别器的相关峰能够实现图像识别^[3], 通过设计合适的滤波器可实现图像消模糊和图像复原等^[4]。对光场进行去卷积运算, 可以消除散斑和离焦信号等噪音, 提高物体位置的测量精度^[5]。

电磁感应透明(EIT)效应是一种量子相干效应^[6-9]。通过使用一束较强的耦合光场将 Λ -型三能级系统

收稿日期: 2016-10-08; **收到修改稿日期:** 2016-10-17

基金项目: 国家 973 计划(2013CB328702)、国家自然科学基金(61475077)

作者简介: 李志向(1988—), 女, 博士研究生, 主要从事基于电磁感应透明效应的光信息处理方面的研究。

E-mail: zhixiang@mail.nankai.edu.cn

导师简介: 张国权(1971—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事量子相干光子学、非线性光学与光场调控等方面的研究。

E-mail: zhanggq@nankai.edu.cn(通信联系人)

中的两个能级耦合起来,基于量子消相干效应使得介质对另一束共振跃迁探测光透明,因此,在介质的一个较宽的吸收谱中就出现了一个很窄的透明窗口,称为 EIT 窗口。EIT 窗口通常伴随着强烈的色散效应,利用这一特性研究者已经成功地实现了光群速的减慢和光脉冲的相干存储^[10-11]、光学图像的存储和读取^[12-15]以及光量子态的存储和读取^[16-18]等。近年来,本课题组基于 EIT 效应的光脉冲存储和读取技术发展了一系列的光学信息处理技术,实现了光脉冲的角度复用多脉冲存储和可寻址的多通道全光缓存^[19]、光脉冲的相位共轭波^[20]以及涡旋光拓扑电荷数的存储、转移和代数运算^[21]等。

本文采用 4f 光学成像系统,基于 EIT 效应的光脉冲存储和读取过程,理论分析并实验实现了两路输入光学信息之间的卷积运算。

2 基本原理

图 1(a)为在 4f 成像系统中利用基于 EIT 效应的光脉冲存储和读取过程实现两路输入光学信息之间卷积运算的装置示意图,其中 M1 和 M2 是两个加载信息用的掩模板,BS 为半透半反镜,iCCD 为增强型光探测器,L1 和 L2 是组成 4f 成像系统的透镜, (x_0, y_0) 、 (x, y) 和 (x_i, y_i) 分别是 4f 成像系统的物平面、共焦面和像平面坐标,L1 和 L2 的焦距 $f=30$ cm,插图显示了输入信号光和读取光在共焦面上的光强分布图。掺镨硅酸钇晶体(Pr:YSO,掺杂浓度为 0.05%,厚度为 3 mm)置于 4f 成像系统的共焦平面上,整个晶体处在 3.4 K 的低温恒温室内,可满足实现 EIT 效应所需的低温条件^[19-21]。利用 Pr^{3+} 离子的 $^1\text{D}_2$ 和 $^3\text{H}_4$ 的超精细能级形成实现 EIT 效应和光脉冲存储所需的 Λ -型三能级结构,如图 1(b)所示,其中 a 、 b 、 c 为三能级 Λ -型能级结构的超精细能级, m_1 为核自旋磁量子数。信号光脉冲 E_S 经置于透镜 L1 前焦面上的 M1 调制后,再经透镜 L1 进入 Pr:YSO 晶体中,与耦合光 E_C 相互作用。当信号光脉冲 E_S 和耦合光脉冲 E_C 都进入晶体中,且满足双光子共振条件时,可以实现 EIT 效应。此时,若将耦合光关闭,信号光脉冲会以原子相干光栅的形式存储于 Pr:YSO 晶体中^[19-21]。经过一段存储时间后,重新打开耦合光并将其作为读取光,会得到一个复原的信号光脉冲。

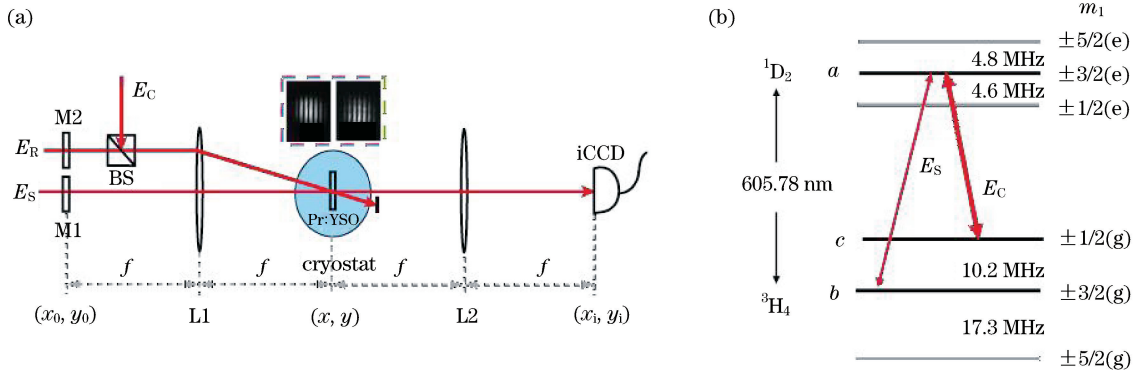


图 1 (a) 实验装置示意图;(b) Pr^{3+} 离子 $^1\text{D}_2 \leftrightarrow ^3\text{H}_4$ 跃迁的超精细能级结构

Fig. 1 (a) Schematic diagram of experimental setup; (b) fine energy level structure of

$^1\text{D}_2 \leftrightarrow ^3\text{H}_4$ transition of Pr^{3+} ions

如图 1(a)所示,假设让读取光通过另外一个掩模板 M2,给读取光 E_R 加载上光学信息,在共焦面上新产生的读出光的振幅 $E_{S'}$ 有如下形式^[20,22]

$$E_{S'}(x, y) \propto E_S(x, y)E_C^*(x, y)E_R(x, y), \quad (1)$$

式中 $E_j(x, y)$ ($j=S, C, R, S'$) 分别是在共焦面上的信号光、耦合光、读取光和新产生的读出光的振幅。 $E_S(x, y)$ 和 $E_R(x, y)$ 分别是物平面上输入信号光 $E_S(x_0, y_0)$ 和读取光 $E_R(x_0, y_0)$ 经透镜 L1 进行傅里叶变换的结果,假设耦合光是一束高斯光束, $E_C(x, y)$ 可近似地看作是一个常数振幅。因此,(1)式可进一步写成

$$E_{S'}(x, y) \propto E_S(x, y)E_R(x, y). \quad (2)$$

根据卷积定理,新产生的光 $E_{S'}(x, y)$ 经透镜 L2 变换之后,在 4f 成像系统的像平面上形成的振幅分布是输

入信号振幅和读取振幅的卷积,即

$$E_S(x_i, y_i) \propto E_S(x_i, y_i) \otimes E_R(x_i, y_i)。 \quad (3)$$

需要指出的是,上述推导中并没有考虑 4f 成像系统本身的点扩展函数 $h(x_i, y_i)$ 的影响。当考虑 4f 成像系统本身的点扩展函数的影响时,像平面上的实际振幅为 $E_S(x_i, y_i)$ 与点扩展函数 $h(x_i, y_i)$ 的卷积。

将两个双缝 M1 和 M2 分别加载到信号光和读取光上,以此作为一个具体的例子,计算在共焦平面上基于 EIT 效应进行光脉冲存储和读取操作之后,在 4f 成像系统的像平面上进行卷积运算后的振幅分布。在物平面上透过双缝结构 M1 之后的信号光的振幅为

$$E_S(x_0) \propto \text{rect}\left(\frac{x_0 - d/2}{a}\right) + \text{rect}\left(\frac{x_0 + d/2}{a}\right), \quad (4)$$

式中 d 是双缝的间距, a 是缝宽, $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形函数。在傍轴近似下, 4f 成像系统的共焦面上的振幅为

$$E_S(x) \propto \cos\left(\frac{\pi dx}{\lambda f}\right) \text{sinc}\left(\frac{\pi ax}{\lambda f}\right), \quad (5)$$

式中 λ 为入射光的波长。显然, (5) 式中 $\cos\left(\frac{\pi dx}{\lambda f}\right)$ 是双缝干涉因子, 对应的干涉条纹周期 $\Delta x = \lambda f/d$,

$\text{sinc}\left(\frac{\pi ax}{\lambda f}\right)$ 是单缝衍射因子, 所以最终得到的振幅分布是被单缝衍射因子调制的双缝干涉条纹。基于 EIT 效应, 关闭耦合光场 E_C , 将 (5) 式表示的信号光场存储在 Pr:YSO 晶体中。

在读取光 E_R 上也加载间距为 d 和缝宽为 a 的双缝结构 M2。与 M1 不同的是, 在 M2 的其中一条狭缝上加载相位 φ , 使透过两条狭缝的透射光之间存在相位差 φ , 因此, 在 4f 成像系统的共焦平面上的振幅分布可表示为

$$E_R(x) \propto \cos\left(\frac{\pi dx}{\lambda f} + \frac{\varphi}{2}\right) \text{sinc}\left(\frac{\pi ax}{\lambda f}\right)。 \quad (6)$$

由 (3) 式可知, 当不考虑 4f 成像系统本身的点扩展函数的影响时, 在 4f 成像系统像平面上的振幅分布为输入的信号光的振幅 E_S 和读取光的振幅 E_R 的卷积。

根据卷积积分理论^[23-24]可知, 在一般情况下, 具有两个双缝结构的振幅的卷积运算结果是一个三峰结构, 每个峰的光场强度呈三角形函数分布, 峰与峰之间的间距为 d , 且各峰峰值的相对比值可由相位因子 φ 调控。图 2 是不同相位因子 φ 下的两个双缝结构光场的卷积运算结果, 其中 $a = 200 \mu\text{m}$, $d = 1000 \mu\text{m}$ 。可以看到, 当相位因子 φ 取不同值时, 各峰峰值之间的比值发生了变化。尤其值得注意的是, 当相位因子 $\varphi = \pi$ 时, 4f 成像系统共焦平面上的振幅分布可表示为

$$E_S(x) \propto \sin\left(\frac{2\pi dx}{\lambda f}\right) \text{sinc}^2\left(\frac{\pi ax}{\lambda f}\right), \quad (7)$$

像平面上的光场强度分布呈双峰结构, 峰与峰之间的间距变成了 $2d$, 如图 2(d) 所示。

3 实验结果与分析

Pr:YSO 晶体置于英国牛津公司生产的 Optistat AC-V12 低温恒温室中, 镨离子 Pr^{3+} 的 $^1D_2 \leftrightarrow ^3H_4$ 跃迁对应的超精细能级结构提供了实现 EIT 效应所需的三能级 Λ -型能级构型, 在 3.4 K 低温下吸收谱线的中心波长为 605.78 nm。在实验中, 将波长为 605.78 nm 的单频染料激光器 (Coherent 899-29) 输出的激光分为三束, 再分别经由声光调制器调制成不同频率、强度和脉宽的光脉冲信号; 在耦合光 E_C 和信号光 E_S 分别与三能级 Λ -型能级构型的两个跃迁通道共振耦合的条件下^[22] [如图 1(b) 所示], 可以观测到 EIT 效应, 如图 3(a) 所示。

图 3(b) 是实现基于 EIT 效应的光脉冲存储和读取所用的光脉冲时间序列示意图。物平面上信号光的入射功率为 12 mW, 耦合光和读取光的入射功率均为 25 mW。先打开耦合光 E_C , 然后开启具有双缝结构的信号光脉冲 E_S (脉冲时间为 5 μs), 待信号光脉冲进入晶体后关闭 E_C , 则信号光脉冲经透镜 L1 后在共焦平面上的傅里叶频谱会被存储在晶体中。经过 3 μs 的存储时间之后, 开启另一束和 E_C 的传播方向共线的读取

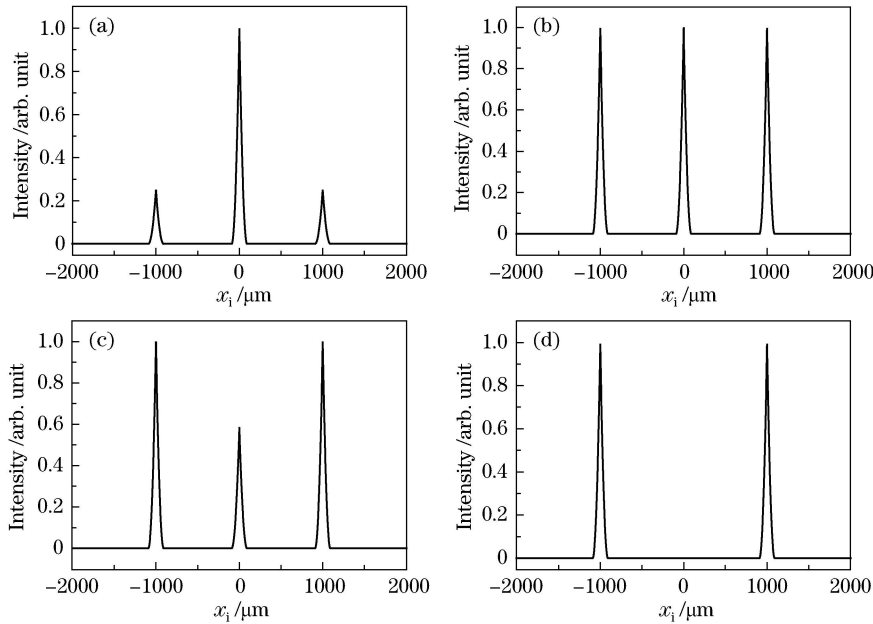


图 2 两个双缝结构光场间的卷积运算的模拟结果。(a) $\varphi=0$; (b) $\varphi=\pi/3$; (c) $\varphi=3\pi/8$; (d) $\varphi=\pi$
 Fig. 2 Simulation results of convolution operation of two light fields with double-slit structure.
 (a) $\varphi=0$; (b) $\varphi=\pi/3$; (c) $\varphi=3\pi/8$; (d) $\varphi=\pi$

光 E_R 以读取存储在晶体中的光脉冲信息,其中 E_R 也呈双缝结构。新产生的读出光 E_S 再经透镜 L2 变换后,在其像方焦平面上形成 E_S 和 E_R 的卷积图像信息,并由 iCCD 接收。

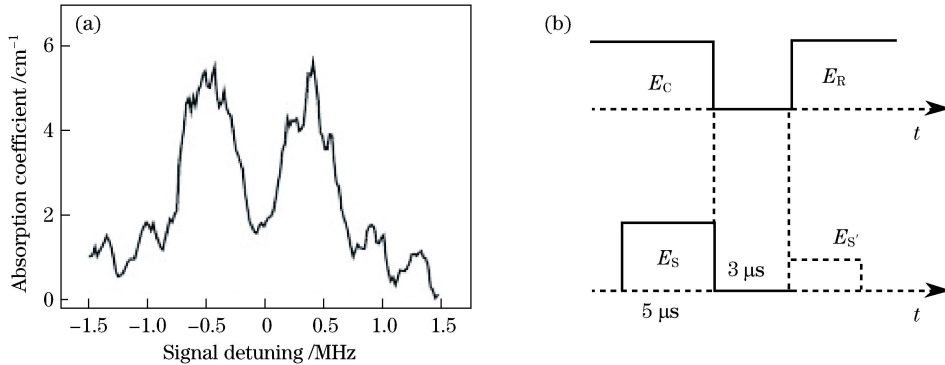


图 3 (a) 典型的 EIT 效应实验观测图; (b) 在信号光脉冲的存储与读取过程中,各光脉冲的时间序列示意图
 Fig. 3 (a) Typical experimental observation of EIT effect; (b) schematic diagram of time sequence of light pulses during the storage and readout process of signal light

图 4 是在不同 φ 条件下实验测得的卷积图象及其一维强度分布曲线。可以看到,与理论预言的结果一致,在一般情况下,两个双缝结构输入图像的卷积为三峰结构,峰与峰之间的间距为 d ,各峰强度的相对分布随 φ 的变化而变化。当 $\varphi=0$ 时,中间峰的峰值强度高于两侧对称分布的侧峰峰值强度;随着 φ 值的增大,中间峰的峰值强度逐渐降低,两侧侧峰的峰值强度逐渐增大。尤其值得注意的是,当 $\varphi=\pi$ 时,中间峰的峰值强度为零,卷积图像变为两峰结构,峰与峰之间的间距为 $2d$,如图 4(a4)、(b4) 所示。当 φ 值进一步增大时,中间峰重新出现,并且其峰值强度逐渐变大,各峰峰值强度分布随 φ 的变化趋势与前述 φ 在 $[0, \pi]$ 之间的变化趋势刚好相反;当 $\varphi=2\pi$ 时,各峰峰值强度的分布与 $\varphi=0$ 的情况一致。对比图 4 中实验测量的强度分布曲线和图 2 中理论计算的强度分布曲线可以看到,实验测量的峰形强度分布曲线偏离了理论计算的三角形函数强度分布曲线。这主要是因为理论卷积计算的过程中,没有计入 $4f$ 成像系统本身的点扩展函数的影响^[23-24]。

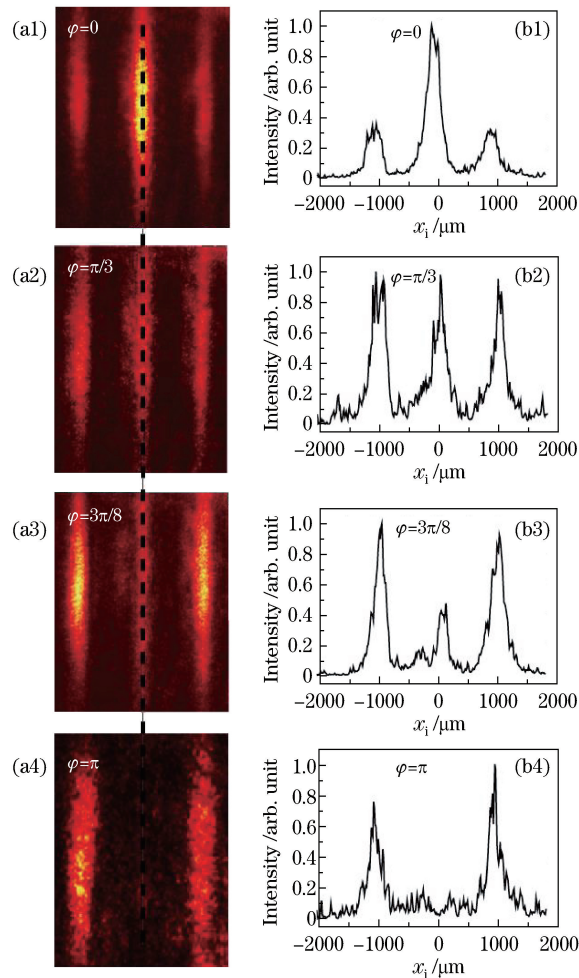


图 4 不同 φ 值下, (a1)(a2)(a3)(a4) 实验测得的卷积图象和 (b1)(b2)(b3)(b4) 相应的一维强度分布

Fig. 4 (a1)(a2)(a3)(a4) Experimentally measured convolution images and (b1)(b2)(b3)(b4) the corresponding one dimensional intensity distributions under different φ values

4 结 论

在 4f 成像系统的共焦平面上, 通过基于 EIT 效应的光脉冲存储和读取操作, 实现了信号光脉冲和读取光脉冲这两路输入光学图像之间的卷积。通过控制存储的信号光脉冲和读取光脉冲在共焦面上空间频谱之间的相对相移, 实现了对信号光和读取光之间卷积输出图像的调控。研究表明, 在 4f 成像系统的焦平面上通过基于 EIT 效应的光信息存储和读取机制, 可以利用修饰或者调控读取光场实现对信号光场光学信息的相干处理。该技术在光学信息相干处理、光学成像以及光学图像处理等方面有重要的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Su Xianyu, Lü Naiguang, Chen Jiabi. Principles of information optics[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2010: 140-167.
苏显渝, 吕乃光, 陈家璧. 信息光学原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 140-167.
- [2] Kang Hui, Yao Yugui, Guo Zhuanyun, *et al.* A new method of real-time optical image subtraction by grating encoding [J]. Chinese J Lasers, 1994, 21(12): 991-994.
康 辉, 姚裕贵, 郭转运, 等. 一种利用光栅编码实现实时光学图像相减的新方法[J]. 中国激光, 1994, 21(12): 991-994.
- [3] Zhou Liang, Yu Jun, Yang Tuo, *et al.* Analysis and experimental determination for matched filtering recognition of correlation peak[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0907001.
周 亮, 喻 珺, 杨 拓, 等. 匹配滤波识别相关峰的分析与实验判别[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0907001.

- [4] Feng Bihua, Miao Yuan, Cao Linghua, *et al.* The use of a coherent optical feedback system in realizing restoration of degraded image[J]. Chinese J Lasers, 1994, 21(12): 988-990.
冯璧华, 缪 源, 曹伶华, 等. 利用相干光反馈系统实现模糊图像的复原[J]. 中国激光, 1994, 21(12): 988-990.
- [5] Lei Hai, Chang Xinyu, Xie Xiangjun, *et al.* Deconvolution in digital holographic reconstruction for high accuracy position of microsphere tracking technology[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0409001.
雷 海, 常新宇, 谢湘军, 等. 去卷积数字全息重构的微球位置精确测量[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0409001.
- [6] Harris S E. Electromagnetically induced transparency[J]. Physics Today, 1997, 50(7): 36-42.
- [7] Fleischhauer M, Imamoglu A, Marangos J P. Electromagnetically induced transparency: Optics in coherent media[J]. Reviews of Modern Physics, 2005, 77(2): 633-673.
- [8] Fleischhauer M, Lukin M D. Dark-state polaritons in electromagnetically induced transparency[J]. Physical Review Letters, 2000, 84(22): 5094-5097.
- [9] Fleischhauer M, Lukin M D. Quantum memory for photons: Dark-state polaritons[J]. Physical Review A, 2002, 65(2): 022314.
- [10] Hau L, Harris S, Dutton Z, *et al.* Light speed reduction to 17 meters per second in an ultracold atomic gas[J]. Nature, 1999, 397(6720): 594-598.
- [11] Turukhin A V, Sudarshanam V S, Shahriar M S, *et al.* Observation of ultraslow and stored light pulses in a solid[J]. Physical Review Letters, 2001, 88(2): 023602.
- [12] Shuker M, Firstenberg O, Pugatch R, *et al.* Storing images in warm atomic vapor[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(22): 223601.
- [13] Vudyasetu P, Camacho R, Howell J. Storage and retrieval of multimode transverse images in hot atomic rubidium vapor[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(12): 123903.
- [14] Heinze G, Rudolf A, Beil F, *et al.* Storage of images in atomic coherences in a rare-earth-ion-doped solid[J]. Physical Review A, 2010, 81(1): 011401.
- [15] Liu C, Dutton Z, Behroozi C H, *et al.* Transfer and conversion of images based on EIT in atom vapor[J]. Optics Letters, 2014, 39(9): 2723-2726.
- [16] Chaneliere T, Matsukevich D, Jenkins S, *et al.* Storage and retrieval of single photons transmitted between remote quantum memories[J]. Nature, 2005, 438(7069): 833-836.
- [17] Choi K S, Deng H, Laurat J, *et al.* Mapping photonic entanglement into and out of a quantum memory[J]. Nature, 2008, 452(7183): 67-71.
- [18] Rieländer D, Kutluer K, Ledingham P M, *et al.* Quantum storage of heralded single photons in a praseodymium-doped crystal[J]. Physical Review Letters, 2014, 112(4): 040504.
- [19] Tu Y, Zhang G, Zhai Z, *et al.* Angular multiplexing storage of light pulses and addressable optical buffer memory in $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ based on electromagnetically induced transparency[J]. Physical Review A, 2009, 80(3): 033816.
- [20] Zhai Z, Dou Y, Xu J, *et al.* Nondegenerate phase-conjugate wave via stored atomic coherence based on electromagnetically induced transparency in solids[J]. Physical Review A, 2011, 83(4): 043825.
- [21] Zhai Z, Li Z, Xu J, *et al.* Transfer and computation of optical topological charges via light pulse buffer memory in an electromagnetically-induced-transparency solid[J]. Physical Review A, 2013, 88(3): 035807.
- [22] Zhai Zhaohui. Storage and processing of light pulses based on electromagnetically induced transparency effect in praseodymium doped yttrium silicate crystal[D]. Tianjin: Nankai University, 2013: 38-46.
翟召辉. 掺镨硅酸钇晶体中基于电磁感应透明的光脉冲存储与处理[D]. 天津: 南开大学, 2013: 38-46.
- [23] Lü Naiguang. Fourier optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2008: 12-16.
吕乃光. 傅里叶光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 12-16.
- [24] Hecht E. Optics[M]. San Francisco: Addison Wesley, 2002: 532-542.