

基于电磁感应透明效应的光学图像加减^{*}刘建基¹⁾ 刘甲琛¹⁾ 张国权^{1)2)†}

1) (南开大学物理科学学院、泰达应用物理研究院, 弱光

非线性光子学教育部重点实验室, 天津 300457)

2) (山西省极端光学协同创新中心, 太原 030006)

(2022 年 8 月 1 日收到; 2023 年 3 月 5 日收到修改稿)

电磁感应透明效应是基于原子不同跃迁通道之间的量子相干效应, 可以使得原子系综对于光场的吸收率降低, 甚至接近于 0, 同时在原子共振频率附近伴随着强烈的色散, 因而被广泛应用于群速度调控、光脉冲存储和光场的相干调控等领域. 本文基于电磁感应透明效应, 通过信号光场、耦合光场和读取光场操控复现光场, 在 $4f$ 系统的像面上实现了光学图像的加减操作. 相较于通常在频谱面上利用余弦光栅进行滤波的方案, 基于电磁感应透明效应的方案无需制备频谱面滤波掩模版, 并且只产生正一级和负一级衍射图像, 无 0 级衍射图像干扰, 可广泛应用于光学图像的动态实时处理.

关键词: 光学图像处理, 电磁感应透明效应, 图像加减**PACS:** 42.30.Va, 33.80.-b, 42.30.Kq, 42.50.Ex**DOI:** 10.7498/aps.72.20221560

1 引言

光学图像处理是对图像信息使用光学的办法进行分析、提取和加工的技术. 它通常基于傅里叶变换技术, 在透镜的焦平面上对光学图像的空间频率进行操控, 从而实现对光学图像的模糊、增强、加密、解密、加减、微分和卷积等特定的操作^[1-5]. 在数字化图像处理技术使用越来越广泛的今天, 光学图像处理技术仍具有很强的不可替代性, 主要原因是光学图像处理技术具有高效的并行运算能力, 图像越复杂, 其处理速度的优势就越明显. 光学图像处理技术可以广泛应用于图像识别、地球遥感、资源探测和气象监测等领域, 并且由于并行运算的优势, 它也可以成为构成光学神经网络的基础之一, 在人工智能等领域有望发挥出重要的作用. 光学图像处理技术的主要缺点是组件复杂、体积庞

大, 难以和电子计算机兼容, 因此其应用受到了限制. 但随着未来光子计算机研究的深入, 光学图像处理技术独具的低能耗、超高运算速度、信息失真小的对比优势将越来越明显, 其特性可以和光子计算机很好地衔接, 从而有望与数字化图像处理技术并驾齐驱. 传统的光学图像处理技术, 通常需要在傅立叶频谱面上对图像的空间频谱进行特定操作, 因而需要提前制备特定的掩模版、衍射光栅等光学滤波元件, 尤其在频谱面位于低温腔室等特殊情况下, 通常难以对空间频谱直接进行操作^[6]. 结合光学图像处理技术和电磁感应透明 (electromagnetically induced transparency, EIT) 效应, 以 EIT 介质作为光学频谱面上可动态擦写的滤波掩模版, 可以实现无需提前制备频谱面滤波掩模版的图像加减操作.

EIT 是实现光脉冲存储的重要手段之一, 它基于光和原子的相互作用, 通过一束强耦合光场与原

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 12104242, 91750204, 61475077)、高等学校学科创新引智计划 (批准号: B23045) 和中央高校基本科研业务费资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: gqzhang@nankai.edu.cn

子系综相互作用, 从而改变原子能级布居分布, 使得原子系综处于暗态, 这时原子对于在共振频率附近的光子的吸收率降低, 表现出透明的性质, 因而被称作电磁感应透明效应. 由于吸收特性的剧烈变化, 相应地, 在共振频率附近光场的群速度也会降低, 产生慢光现象. 再通过光脉冲存储技术, 绝热地关闭耦合光, 可以将需要存储的信号光存储在原子系综中. 自 1990 年美国斯坦福大学的 Harris 等 [7] 提出 EIT 效应以来, 研究人员已在不同的体系中实现了 EIT 效应, 如冷原子体系 [8,9]、热原子体系 [10,11]、稀土离子掺杂晶体 [12,13] 等. 相比原子气体, 基于稀土离子掺杂晶体的固态量子存储体系, 具有存储密度高、无原子运动带来的信息失真和易于集成等优势, 非常适合于图像信息处理. 目前, EIT 效应已被应用于光学信息图像存储 [14]、涡旋光场操控 [15–17] 等领域. 除了经典光领域的应用, EIT 效应也被广泛应用于光量子存储 [18] 及量子逻辑门 [19] 等方向. 青岛理工大学的邱田会等 [20] 从理论上设计了通过四能级系统的 EIT 效应和交叉相位调制引入的相位差的方法, 实现了两组光学图像加减操作的方案, 显示了 EIT 效应在全光操控及量子信息处理领域的潜在应用价值. 不同于该方案, 由于经过基于 EIT 效应存储的光脉冲, 其复现光场的空间频率成分与信号光场、耦合光场和读取光场的空间频率成分均有关, 同时带有不同光场的信息, 因而可以通过操控各个光场的空间频率成分, 实现对光学图像的特定操作. 本文的主要工作就是

基于掺镨硅酸钇 ($\text{Pr:Y}_2\text{SiO}_5$, Pr:YSO) 晶体的 EIT 效应实现无需提前制备频谱面滤波掩膜版的光学图像动态加减操作.

2 理论分析

通过 EIT 效应实现光脉冲存储的过程如下 [21]: 首先使用光谱烧孔技术在 Pr:YSO 晶体中完成 Λ 型三能级系统初态的制备, 如图 1(a) 所示, 将一束强耦合光 E_C 入射到 Pr:YSO 晶体中, 其频率对应能级跃迁 $|a\rangle \leftrightarrow |b\rangle$, 使得原子系综处于暗态, 这时在共振跃迁频率 $|a\rangle \leftrightarrow |c\rangle$ 附近, 晶体对于另一束信号光 E_S 的吸收率就会降低, 同时伴随着强烈的色散, 导致信号光的群速度降低. 然后, 绝热地关闭耦合光, 信号光群速可以降到 0, 并以原子相干光栅的形式存储在 Pr:YSO 晶体中. 经过一定的存储时间, 打入一束和耦合光同频同向的读取光 E_R , 可以把信号光完全复现出来, 从而实现光脉冲的存储和复现. 为了避免读取光对复现光的干扰, 一般耦合光、读取光与信号光之间需要有一定的夹角, 其夹角通常设置在 1° – 3° 之间.

与自发参量下转换等过程类似, 基于 EIT 效应的光脉冲存储和读取过程需要满足相位匹配条件. 翟召辉 [22] 利用密度矩阵方程和波方程对光脉冲的存储和读取做了理论分析, 表明经过存储和读取过程后的复现光场 $E_{S'}$ 是所有原子在该光场方向上辐射场的相干叠加, 可表示为

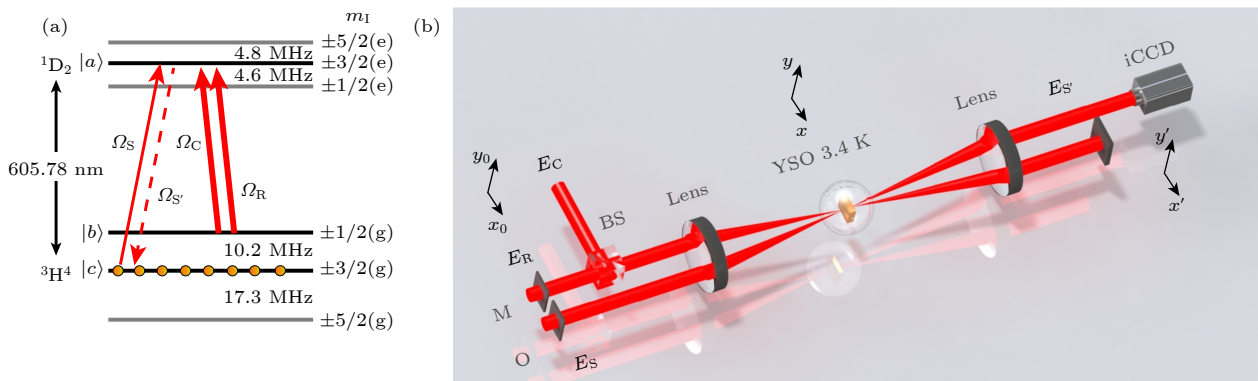


图 1 (a) Pr:YSO 晶体中 Pr 离子参与 EIT 效应的能级结构图, 其中, Ω_S , Ω_C , Ω_R , $\Omega_{S'}$ 分别为信号光、耦合光、读取光、复现光对应的拉比频率; (b) 基于 EIT 效应实现图像加减操作的实验装置示意图, 其中, BS 为 50:50 分束器, Lens 为焦距 300 mm 的凸透镜, iCCD 为增强型 CCD; 掩膜版 M 为待处理的图像, 掩膜版 O 为双缝; Pr:YSO 晶体置于 3.4 K 的低温腔中

Fig. 1. (a) Energy level structure of Pr ions involved in the EIT process in Pr:YSO crystal. Here, Ω_S , Ω_C , Ω_R , $\Omega_{S'}$ are the Rabi frequencies of the signal, coupling, readout, and retrieval fields, respectively. (b) Schematic diagram of the experimental setup for image addition and subtraction based on the EIT effect. Here, BS, 50:50 beam splitter; Lens, convex lens with a 300-mm focal length; iCCD, intensified CCD. The mask M is the image to be processed, and the mask O is a double-slit mask. The Pr:YSO crystal is placed in a cryogenic vacuum chamber at 3.4 K.

$$E_{S'}(\mathbf{r}, t) \propto e^{-i\omega_{ac}t} f(t) E_S E_C^* E_R \times \int \eta(\mathbf{r}) e^{-i(-\mathbf{k}_S + \mathbf{k}_C - \mathbf{k}_R + \mathbf{k}_{S'}) \cdot \mathbf{r}} d^3\mathbf{r}, \quad (1)$$

其中, \mathbf{r} 为晶体中镨离子的位置矢量; t 为时间; ω_{ac} 为能级 $|a\rangle$ 和 $|c\rangle$ 之间的共振跃迁角频率; $f(t)$ 为光脉冲随时间变化的慢变包络函数; E_S , E_C , E_R 分别为信号光、耦合光、读取光的振幅分布; 上标“*”号表示取复共轭; $\eta(\mathbf{r})$ 为位置 \mathbf{r} 处原子数密度; \mathbf{k}_S , \mathbf{k}_C , \mathbf{k}_R , $\mathbf{k}_{S'}$ 分别为信号光、耦合光、读取光和复现光的波矢量. 在相位匹配的情形下, 四束光满足动量守恒关系, 即 $-\mathbf{k}_S + \mathbf{k}_C - \mathbf{k}_R + \mathbf{k}_{S'} = 0$. 由于晶体较短, 相互作用长度也较短, 慢变包络函数基本不变, 因此, 可以将复现光光场的空间分布写为如下表达式:

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

其中, $E_j(x, y)$ ($j = S, C, R, S'$) 分别对应信号光场、耦合光场、读取光场和复现光场的空间振幅分布. 利用这一特点, 可以将基于 EIT 效应的光脉冲存储和读取技术应用于光场的相干操控中. 过去的研究通常要求基于 EIT 效应的光脉冲存储完全保持信号光的信息; 在读取所存储的信息时, 更加关注复现光场的保真度等相关参数 [23]. 与传统的要求不同, 方程 (2) 表明, 当耦合光场、读取光场自身也具有特殊的光场分布时, 将会对复现光场产生影响, 从而实现对复现光场的相干调控. 如当光场携带轨道角动量时, 在基于 EIT 效应的信号光场的存储和读取过程中相互作用光场的拓扑荷数必须守恒. 基于这一拓扑荷守恒要求, 可以实现信号光场、耦合光场和读取光场之间拓扑荷的转移、反转和加减等操作, 从而控制复现光场的拓扑荷数, 并有可能通过携带低拓扑荷数的光场制备出具有高拓扑荷数的复现光场 [24]. 由于光脉冲的存储和读取过程需要满足相位匹配条件, 通过背向读取的方式, 可以使得复现光场相对于信号光场形成时间反演波, 实现非简并相位共轭波 [25], 可以应用于波前的修复. 此外, 基于 EIT 效应的光脉冲存储和读取过程, 还可以实现光场的一阶亚波长干涉 [26]、光学卷积 [27] 等操作.

实验装置示意图如图 1(b) 所示, Pr:YSO 晶体放置在 4f 系统的共焦频谱面上, 在读出光和信号光光路中的物面位置分别放置掩模版 M 和 O, 用 iCCD 在 4f 系统的像面上进行探测. 在实验中, 掩

模版 M 为待处理的图像, 掩模版 O 为双缝, 为实现图像加减, 需要保证双缝间距与掩模版 M 上两个图案之间的间距相同.

首先, 将一束高斯光束作为耦合光与经过双缝掩模版 O 的信号光同时打入 Pr:YSO 晶体中, 利用光脉冲存储技术 [21], 可以将双缝图像的傅里叶频谱存储在 Pr:YSO 晶体中. 为了便于描述, 这里考虑一维情况, 在傍轴近似下, 4f 系统共焦频谱面上信号光的光强分布可以表示为

$$E_S(k_x) \propto \text{sinc}(k_x a/2) \cos(k_x d/2), \quad (3)$$

其中, $k_x = 2\pi x/(\lambda f)$ 为频谱面波矢分量, x 为频谱面上的坐标, d 为双缝间距, a 为双缝的缝宽, λ 为波长, f 为透镜焦距, $\text{sinc}(k_x a/2)$ 为单缝衍射因子, $\cos(k_x d/2)$ 为双缝干涉因子.

在耦合光光斑较大的情况下, 频谱面上 $E_C(k_x)$ 的分布可以看成常数, 这样基于 EIT 效应, 绝热地关闭耦合光 $E_C(k_x)$, 就可以将信号光的空间频谱存储在 Pr:YSO 晶体中, 其分布可以用方程 (3) 描述. 经过一定存储时间后, 用读取光 $E_R(k_x)$ 入射到晶体中, 从而获得复现光场 $E_{S'}(k_x)$. 这里, 读取光 $E_R(k_x)$ 先经过掩模版 M, 其中掩模版 M 由两部分组成, 左边为图像 A (或图像 C), 右边为图像 B (或图像 D), 左边图像 A/C 与右边图像 B/D 之间的间距与掩模版 O 中的双缝间距相同, 假定其频谱分布为 $E_R(k_x)$. 在基于 EIT 效应的光脉冲存储与复现过程中, 在频谱面上复现光场的空间频谱 $E_{S'}(k_x)$ 为信号光场、耦合光场和读取光场的空间频谱的乘积, 因此复现光场的空间频谱可以看作是读取光场的空间频谱经过存储在晶体中的双缝空间频谱 (即夫琅禾费衍射图案) 调制而得到的. 存储在 Pr:YSO 晶体中的双缝衍射图案相当于一块余弦光栅, 则复现光场的空间频谱 $E_{S'}(k_x)$ 可以描述为

$$E_{S'}(k_x) \propto E_R(k_x) \text{sinc}(k_x a/2) \cos(k_x d/2). \quad (4)$$

根据欧拉公式, 可以将方程 (4) 改写成以下形式:

$$E_{S'}(k_x) \propto \frac{1}{2} E_R(k_x) \text{sinc}\left(\frac{k_x a}{2}\right) e^{i\frac{k_x d}{2}} + \frac{1}{2} E_R(k_x) \text{sinc}\left(\frac{k_x a}{2}\right) e^{-i\frac{k_x d}{2}}. \quad (5)$$

从方程 (5) 可以看出, 读出光场的空间频谱经由存储在 Pr:YSO 晶体中的双缝衍射图案调制后, 复现光场被分离成 +1 级和 -1 级两个部分, 这两个

部分的相位恰好相反, 其频谱经 $4f$ 系统的后透镜进行傅里叶变换后, 可以在像面上得到图像分布. 该图像也是由两部分构成, 它们具有相同的强度分布, 但相位相反, 可表示为

$$U_+(x') \propto E_R(x') \otimes \text{rect}(2x'/a), \quad (6)$$

$$U_-(x') \propto -E_R(x') \otimes \text{rect}(2x'/a), \quad (7)$$

其中, $U_+(x')$ 代表 +1 级光场, $U_-(x')$ 代表 -1 级光场, \otimes 为卷积运算符, x' 为像面上的坐标. $\text{rect}(2x'/a)$ 为一维矩形函数, 它从单峰衍射因子而来, 由于它的存在以及耦合光场大小的限制, 图像的高频成分会有一定的丢失, 使得图像边缘变得模糊. 通过逆傅里叶变换可知, +1 级和 -1 级两部分光场间距为 d , 与双缝间距相同. 这样在设计时, 可以让读取光路中的掩膜版 M 具有两个不同的图案, 并且图案间距为 d , 这两个图案的空间频谱, 在经过所存储的原子双缝衍射光栅调制后, 均会产生 +1 级和 -1 级两部分光场. 通过两个图案的 +1 级光场与 +1 级光场的叠加, 或 -1 级光场与 -1 级光场的叠加, 可以实现图像相加. 通过两个图案的 +1 级光场与 -1 级光场的叠加, 或 -1 级光场与 +1 级光场的叠加, 可以实现图像相减. 不同的图案叠加方式可以通过平移傅里叶面上的双缝衍射图案实现, 根据傅里叶光学中的位移相移定理, 傅里叶面上衍射屏的位移会导致夫琅禾费衍射场的相移, 其相移量 $\Delta\phi$ 与位移量 Δu 成正比:

$$\Delta\phi = -k\sin\theta \cdot \Delta u, \quad (8)$$

其中, k 为波数, θ 为衍射角. +1 级衍射场与 -1 级衍射场的相移量正好相反, 这样通过平移双缝衍射图案, 就可以实现不同衍射级次的叠加, 从而实现图像的加减.

3 实验装置及测量结果

选择掺杂浓度为 0.05% 的 Pr:YSO 晶体作为光脉冲存储介质, 晶体尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 通光方向沿 3 mm 方向. YSO 晶体属于单斜晶系, 具有较小的核磁矩, 通常作为宿主晶体使用. Pr^{3+} 离子为一种稀土离子, 由于稀土离子最外层电子轨道是满壳层的, 可以有效地屏蔽外部环境对内层价电子能级跃迁的影响, 因而被广泛地应用于量子存储领域. Pr^{3+} 离子在 YSO 晶体中有两个占位, 分别称为 site 1 和 site 2, 两种不同的占位方式对应着

不同的能级跃迁频率. 本文选择 site 1 占位的离子为研究对象, 其能级跃迁 $^3\text{H}_4 \leftrightarrow ^1\text{D}_2$ 对应的光波长为 605.78 nm . 由于 Pr:YSO 晶体的电磁感应透明窗口小于 1 MHz , 要实现光脉冲存储, 需要激光器具有较窄的线宽和极高的频率稳定性, 使用的激光器是美国光谱物理公司 (Spectra-Physics) 的 Matisse 2 DX 连续光染料激光器, 以若丹明 B(R610) 染料作为增益介质, 当使用 532 nm 连续光泵浦时, 可以得到 $590\text{--}640 \text{ nm}$ 的连续可调激光输出, 在 606 nm 处连续激光功率最高可达 1.3 W , 线宽小于 100 kHz . 由于激光频率需要精确匹配原子能级跃迁才能获得较高的存储效率, 实验中要通过声光调制器 (acoustic optical modulator, AOM) 对激光的功率和中心频率进行调制. 该声光调制器型号为 AA Opto Electronic 公司的 MT110-A1.5-VIS, 调制频率范围为 $110 \text{ MHz} \pm 25 \text{ MHz}$, 调制精度为 0.01 MHz . 使用 AOM 的 Double-Pass 光路配置, 即被调制的激光往返两次通过声光调制晶体, 从而保证经过调制后的光场光斑位置不变. 实验中所用的 Pr:YSO 晶体放置在由 Montana 公司生产的无液氦低温光学恒温器的低温腔中, 晶体温度可以降至 3.4 K , 温度稳定性优于 10 mK , 从而抑制由声子造成的原子跃迁频率的非均匀展宽. 低温腔的外围搭建了一个 $4f$ 系统, Pr:YSO 晶体放置于 $4f$ 系统的共焦频谱面上, 物面位置放置经过特殊设计的掩膜版. 在像面上, 对于复现信号光场, 使用 Andor 公司的 iCCD (DH734) 进行探测. iCCD 由电脉冲信号进行触发, 只在复现信号光场到达的时候开始工作.

在进行光脉冲存储前, 需先从晶体谱线的非均匀展宽中制备出一组具有与入射激光频率相对应的跃迁频率的离子系综, 结合光谱烧孔和光泵浦技术, 可以在 Pr^{3+} 的 $^3\text{H}_4 \leftrightarrow ^1\text{D}_2$ 跃迁超精细能级上制备出一个 Λ 型的三能级系统, 其制备过程如图 2 所示. 首先通过一束扫频光清空 $\pm 1/2(\text{g})$ 和 $\pm 3/2(\text{g})$ 的能级布居, 将离子都布居到 $\pm 5/2(\text{g})$ 基态能级上, 如图 2(b) 所示. 然后使用一束频率对应 $\pm 3/2(\text{e}) \leftrightarrow \pm 5/2(\text{g})$ 的反泵浦光作用到晶体上, 使得离子通过自发辐射回落到 $\pm 1/2(\text{g})$ 和 $\pm 3/2(\text{g})$ 基态能级上, 如图 2(c) 所示. 再打入一束频率对应 $\pm 3/2(\text{e}) \leftrightarrow \pm 1/2(\text{g})$ 的清除光, 将布居在 $\pm 1/2(\text{g})$ 基态能级的离子清空, 使得所有离子布居到 $\pm 3/2(\text{g})$ 基态上, 如图 2(d) 所示.

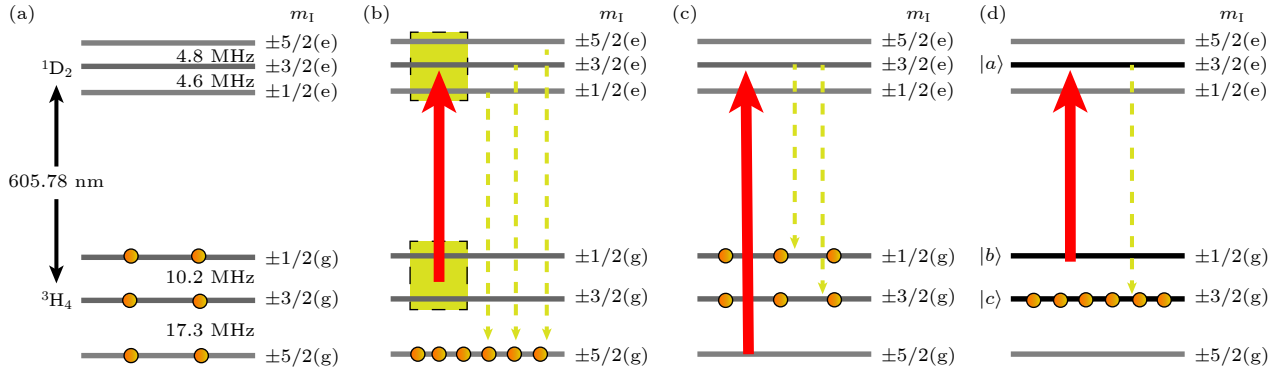
图 2 Pr:YSO 晶体中电磁感应透明效应 Λ 型三能级系统初态制备流程图

Fig. 2. Flow diagram to prepare the initial state for the EIT effect with a Λ -type three-level scheme of Pr^{3+} ions in Pr:YSO crystal.

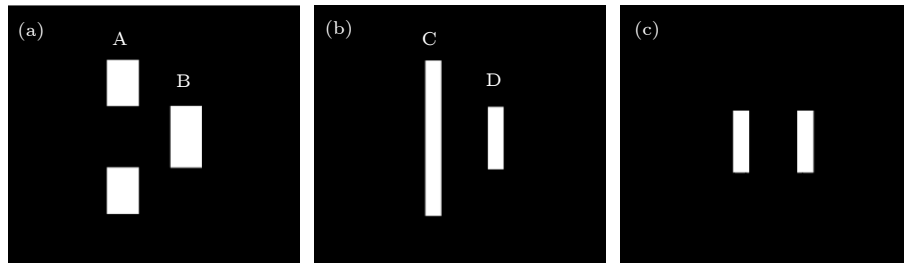


图 3 物面掩模版 (a) 图像相加操作时带有待处理图像的掩模版; (b) 图像相减操作时带有待处理图像的掩模版; (c) 用于制备频谱面滤波光栅的双缝掩模版

Fig. 3. Masks on the object planes: (a) Mask with the images to be processed for image addition; (b) mask with the images to be processed for image subtraction; (c) double-slit mask used to prepare the diffraction grating filter on the Fourier spectral plane.

完成 Λ 型三能级系统初态的制备后, 对光学图像相加进行了实验验证, 光路图如图 1 所示. 首先同时打入一束弱的信号光 E_s 和一束强耦合光 E_c , 信号光一路在 $4f$ 系统的物面上放置掩模版 O, 其结构如图 3(c) 所示, 双缝缝宽为 0.5 mm, 缝间距为 2 mm, $4f$ 系统的两个透镜焦距均为 300 mm. 信号光光强为 1 mW, 耦合光光强为 50 mW. 由于耦合光 E_c 的作用, 原子系综处于暗态, 对信号光 E_s 的吸收率会显著降低, 并伴随强烈的色散, 相应地, 信号光的群速度会明显降低. 然后通过绝热地关闭耦合光 E_c , 可以将信号光的群速度降低到 0, 此时双缝掩模版 O 的频谱信息将被存储在 Pr:YSO 晶体中. 经过大约 10 μs 的存储时间, 打入一束与耦合光 E_c 同频同向的读取光 E_r , 读取光 E_r 经过掩模版 M 入射到晶体中实现光脉冲的复现, 读取光光强为 5 mW. 为了简便起见, 设计了如图 3(a) 所示的掩模版 M, 其中左侧为目标图案 A, 为上下两条狭缝, 右侧为目标图案 B, 为一条狭缝, 狭缝缝宽为 1 mm, 高度均为 2 mm, A 和 B 的图案水平间距为 2 mm. 需要注意的是, 掩模版 O 中的双缝缝间距与掩模版 M 中图案 A 和图案 B 之间

的间距必须相同.

读取光 E_r 的空间频谱信息会传递给复现光 $E_{s'}$, 并且被存储在 Pr:YSO 晶体中的双缝衍射图案调制. 通过精确调控掩模版 O 的位置, 可以实现图像的相加, 复现光场的光强分布的理论模拟结果如图 4(a) 所示, 实验结果如图 4(b) 所示. 可以看到目标图案 A 和目标图案 B 均分离成了两个, 这一现象与我们的理论分析一致. 在图像中心位置, 目标图案 A 的一个衍射级次与目标图案 B 的一个衍射级次实现了图像的相加. 为了避免读取光对探测信号的影响, 在实验中设定读取光 E_r 与信号光 E_s 之间的夹角约为 3° , 因此读取光 E_r 是斜入射到晶体中的, 导致两个图案的衍射角稍有不同, 从而衍射效率也不同, 因而像面的相加图案稍有弯曲, 并且左右光强分布不对称. 另一个原因是电磁感应聚焦或散焦效应, 在基于 EIT 效应进行光脉冲存储的过程中, 强耦合光光场的空间不均匀分布会引起折射率的空间不均匀分布, 这样当读取光经过存储区域时, 读取光也会经历类似的折射率空间不均匀分布, 导致聚焦、散焦或者偏折现象. 涂燕飞^[28]对电磁感应聚焦或散焦效应进行了具体的测试, 电磁

感应聚焦或散焦效应 (electromagnetically induced focusing or defocusing) 同样会加大叠加区域目标图像的错位. 需要指出的是, 在理论模拟时考虑的是完全理想的情况, 即假定光束之间不存在夹角, 并且所有的频谱信息都能收集进去.

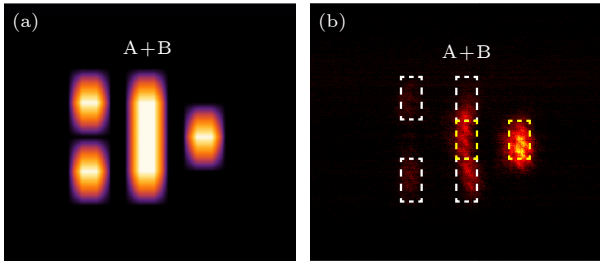


图 4 光学图像相加理论模拟图 (a) 和实验结果图 (b). 左侧的两个短矩形图案和右侧的单个短矩形图案在像面中心实现了相加

Fig. 4. Theoretical simulation result (a) and the experimental result (b) for optical image addition. The two short rectangles on the left and the single short rectangle on the right are added at the center of the image plane.

光学图像相减也可以通过同样的办法进行实验验证. 本文设计了如图 3(b) 所示的掩膜版 M, 其中左侧为目标图案 C, 右侧为目标图案 D, 缝宽均为 0.5 mm, 间距为 2 mm, 左侧目标图案 C 的狭缝高度为 6 mm, 右侧目标图案 D 的狭缝高度为 2 mm. 掩膜版 O 如图 3(c) 所示, 双缝缝宽为 0.5 mm, 缝间距为 2 mm, 与掩膜版 M 中的缝间距一致.

通过平移掩膜版 O, 可以改变复现光场的叠加方式, 当+1 级光场和-1 级光场恰好叠加时, 可以实现图像相减, 最终复现光场的光强分布理论模拟结果如图 5(a) 所示, 实验结果如图 5(b) 所示. 在像面上有三个纵向条纹, 最左边的条纹较长, 最右边的条纹较短, 中间的条纹在接近中心的位置有一个缺口, 为目标图像 C 与目标图像 D 相减得到的, 这一现象与理论分析一致. 实验结果存在光强分布的上下不对称, 主要是由于使用的染料激光器光斑光强分布不均匀, 并不是一个理想的高斯光斑, 并且受到晶体表面质量、光路对准等诸多因素的影响, 而图像减法对光斑质量的要求更苛刻. 由于实验中光脉冲存储效率较低, 通常小于 1%, 导致复现光信号非常弱. 后续实验可以使用更长的晶体, 提高光学深度, 并增大耦合光光强, 从而进一步优化存储效率, 提高复现光光强. 另一方面, 使用双缝掩膜版制备频谱面滤波器的方案受制于光脉冲

的 EIT 存储机制, 图像的空间频率成分中只有部分低频成分被存储进去了, 大量高频成分未被存储, 同时双缝的单缝衍射因子也会抑制高频成分, 使得图像的分辨率降低. 为提高图像存储质量, 可以考虑以双光束干涉光场作为信号光场, 并增大耦合光在频谱面上的光斑大小, 从而提高系统的数值孔径, 改善成像质量. 此外, 也可以通过在物面放置空间光调制器的方法来制备频谱面滤波器, 根据需要处理的图像, 针对性地进行调节, 从而实现对图像的动态处理.

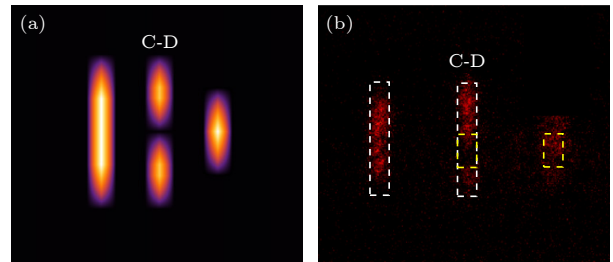


图 5 光学图像相减理论模拟图 (a) 和实验结果图 (b). 左侧的长矩形图案和右侧的短矩形图案在像面中心实现了相减, 产生了上下两个短矩形图案

Fig. 5. Theoretical simulation result (a) and the experimental result (b) for optical image subtraction. The long rectangle on the left and the short rectangle on the right are subtracted at the center of the image plane, producing two separated short rectangles.

4 结 论

基于 EIT 效应的光学图像加减结合了 $4f$ 系统和光脉冲的存储和读取效应, 利用复现光场与信号光场、耦合光场、读取光场相关的特性, 实现像面上光学图像的动态处理, 为傅里叶光学中的图像处理提供了新的方案. 与传统傅里叶光学中利用余弦光栅实现图像加减不同, 基于 EIT 效应的图像处理方案无需制备余弦光栅, 通过调节物面双缝掩膜版即可实现光学图像的处理, 更加灵活方便. 此外, 余弦光栅为强度调制元件, 其透过率函数具有 0 级成分, 因而夫琅禾费衍射场包含了 0 级、+1 级、-1 级三个成分, 基于 EIT 效应的图像处理方案则为振幅型调制, 只有两个图像成分, 可以消除 0 级衍射带来的能量损耗和干扰. 当然, 使用双缝掩膜版制备频谱面滤波器的方案受制于光脉冲的 EIT 存储机制, 图像的空间频率成分中仅有部分低频成分被存储进去了, 大量高频成分未被存储, 同时双缝的单缝衍射因子也会抑制高频成分, 使得图像的空

间分辨率降低. 在后续的实验, 可以考虑以双光束干涉光场作为信号光场, 并进一步增大耦合光的光斑大小, 从而提高图像的处理质量. 基于 EIT 效应的光学图像加减为光学图像处理提供了新的方案, 该方案不局限于图像加减操作, 通过合理的设计, 同样可以实现图像的微分、增强、加密、解密等复杂操作, 因而在光场的相干操控等领域具有重要的应用价值.

感谢南京大学的李志向博士在实验上的帮助及讨论.

参考文献

- [1] Alfalou A, Brosseau C 2015 *Prog. Optics* **60** 119
- [2] Chakraborty S, Saha A, Bhattacharya K 2014 *Optik* **125** 6466
- [3] Gabor D, Stroke G W, Restrick III R C, Funkhouser A T, Brumm D 1965 *Phys. Lett.* **18** 116
- [4] Ebersole J F 1975 *Opt. Eng.* **14** 436
- [5] Mu G G, Jiang J H, Liu G H 1981 *Acta Phys. Sin.* **30** 1609 (in Chinese) [母国光, 蒋建国, 刘国华 1981 *物理学报* **30** 1609]
- [6] Liu S, Guo C L, Sheridan J T 2014 *Opt. Laser Technol.* **57** 327
- [7] Harris S E, Field J E, Imamoglu A 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 1107
- [8] Wang J, Zhu Y, Jiang K J, Zhan M S 2003 *Phys. Rev. A* **68** 063810
- [9] Braje D A, Balić V, Goda S, Yin G Y, Harris S E 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 183601
- [10] Yan H, Liao K Y, Li J F, Du Y X, Zhang Z M, Zhu S L 2013 *Phys. Rev. A* **87** 055401
- [11] Kash M M, Sautenkov V A, Zibrov A S, Hollberg L, Welch G R, Lukin M D, Rostovtsev Y, Fry E S, Scully M O 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 5229
- [12] Ham B S, Hubrich C, Halfmann T 1997 *Opt. Commun.* **144** 227
- [13] Heinze G, Hubrich C, Halfmann T 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 033601
- [14] Qiu T H, Xie M 2017 *Phys. Rev. A* **96** 033844
- [15] Dutton Z, Ruostekoski J 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 193602
- [16] Hamed H R, Kudriasov V, Ruseckas J, Juzeliunas G 2018 *Opt. Express* **26** 28249
- [17] Zhao L 2015 *Opt. Express* **23** 29808
- [18] Wang Y F, Li J F, Zhang S C, Su K Y, Zhou Y R, Liao K Y, Du S W, Yan H, Zhu S L 2019 *Nat. Photonics* **13** 346
- [19] Fleischhauer M, Imamoglu A, Marangos J P 2005 *Rev. Mod. Phys.* **77** 633
- [20] Qiu T H, Ma H Y, Xin P P, Zhao X L, Liu Q, Chen L B, Feng Y C, Yu Z X 2022 *Eur. Phys. J. Plus* **137** 126
- [21] Tu Y F, Zhang G G, Zhai Z H, Xu J J 2009 *Phys. Rev. A* **80** 033816
- [22] Zhai Z H 2013 *Ph. D. Dissertation* (Tianjin: Nankai University) (in Chinese) [翟召辉 2013 博士学位论文 (天津: 南开大学)]
- [23] Lvovsky A I, Sanders B C, Tittel W 2009 *Nat. Photonics* **3** 706
- [24] Zhai Z H, Li Z X, Xu J J, Zhang G Q 2013 *Phys. Rev. A* **88** 035807
- [25] Zhai Z H, Dou Y L, Xu J J, Zhang G Q 2011 *Phys. Rev. A* **83** 043825
- [26] Li Z X, Liu J J, Fan H M, Liu J C, Zhang G Q 2017 *Sci. Rep.* **7** 2361
- [27] Li Z X, Liu J J, Fan H M, Zhang G Q 2017 *Acta Opt. Sin.* **37** 0207003 (in Chinese) [李志向, 刘建基, 范洪鸣, 张国权 2017 *光学学报* **37** 0207003]
- [28] Tu Y F 2009 *Ph. D. Dissertation* (Tianjin: Nankai University) (in Chinese) [涂燕飞 2009 博士学位论文 (天津: 南开大学)]

Optical image addition and subtraction based on electromagnetically induced transparency effect^{*}

Liu Jian-Ji¹⁾ Liu Jia-Chen¹⁾ Zhang Guo-Quan^{1)2)†}

1) (*Key Laboratory of Weak-Light Nonlinear Photonics, Ministry of Education, School of Physics and TEDA Applied Physics Institute, Nankai University, Tianjin 300457, China*)

2) (*Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

(Received 1 August 2022; revised manuscript received 5 March 2023)

Abstract

The electromagnetically induced transparency (EIT) effect is a quantum coherence effect between different atomic transition channels. The absorption of the atomic ensemble is significantly reduced or even close to zero, and at the same time, this effect is accompanied by strong spectral dispersion near the resonant frequency of atoms, which is widely used in group velocity control, light pulse storage, and coherent manipulation on the light field. In the light pulse storage based on the EIT effect, the retrieval field is determined by the signal, coupling, and readout fields, enabling the retrieval field to be dynamically controlled by manipulating the spatial frequency components of the interacting light fields. In this paper, according to the EIT effect, we achieve experimentally the optical image addition and subtraction in the imaging plane of a $4f$ system through the coherent manipulation of the retrieval field via the interacting signal, coupling, and readout fields. Specifically, we first store the spatial frequency spectrum of a double-slit mask in the praseodymium-doped yttrium silicate crystal located in the confocal plane of the $4f$ system based on the EIT effect. Then, we utilize a specially designed mask containing the target objects and perform spatial filtering by using the spatial frequency spectrum of the double-slit mask through the retrieval of stored light pulse. By moving the double-slit mask, the addition and subtraction between the images of target objects can be achieved in the imaging plane of the $4f$ system. We present a theoretical model to describe the addition and subtraction between the target images through the EIT-based light pulse storage technique. The experimental results accord well with the theoretical prediction. Compared with the traditional scheme with a cosine grating filtering the spatial frequency spectrum, our method does not require the preparation of a spatial frequency filter, and only produces the first-order positive and negative diffraction images without the influence of the zeroth-order diffraction image. The optical image addition and subtraction based on the EIT effect provide a new approach to optical image processing. This approach is not limited to image addition or subtraction, and it can be extended to achieve more complex operations such as differentiation, enhancement, encryption, and decryption with rational design. Therefore, it can be widely used in areas such as coherent manipulation of light fields and dynamic optical image processing.

Keywords: optical image processing, electromagnetically induced transparency, optical image addition and subtraction

PACS: 42.30.Va, 33.80.-b, 42.30.Kq, 42.50.Ex

DOI: 10.7498/aps.72.20221560

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12104242, 91750204, 61475077), the 111 Project (Grant No. B23045), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China.

[†] Corresponding author. E-mail: gqzhang@nankai.edu.cn



基于电磁感应透明效应的光学图像加减

刘建基 刘甲琛 张国权

Optical image addition and subtraction based on electromagnetically induced transparency effect

Liu Jian-Ji Liu Jia-Chen Zhang Guo-Quan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 094201 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221560

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221560>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

里德伯电磁感应透明中的相位

Phase in Rydberg electromagnetically induced transparency

物理学报. 2019, 68(8): 084203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181938>

基于调控原子相干的 Λ -型电磁感应透明与吸收

Λ -type electromagnetically induced transparency and absorption by controlling atomic coherence

物理学报. 2022, 71(22): 224201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220950>

Rydberg原子的微波电磁感应透明-Autler-Townes光谱

Microwave electromagnetically induced transparency and Autler-Townes spectrum of cesium Rydberg atom

物理学报. 2018, 67(9): 093201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172645>

基于非对称结构全介质超材料的类电磁诱导透明效应研究

Research on analogue of electromagnetically induced transparency effect based on asymmetric structure all-dielectric metamaterial

物理学报. 2021, 70(19): 194201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210070>

基于里德伯原子电磁诱导透明效应的光脉冲减速

Deceleration of optical pulses based on electromagnetically induced transparency of Rydberg atoms

物理学报. 2021, 70(10): 103201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210102>

点间隧穿调控五能级M型三量子点电磁感应透明介质中的孤子碰撞性质

Controlling collision properties of solitons in five-level M-type triple quantum dot electromagnetically induced transparency medium by inter-dot tunneling coupling

物理学报. 2020, 69(17): 174203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200141>