

文章编号: 1002-1582(2026)03-0346-05

闭合 V 型能级中与空间相关的电磁感应透明

刘碧蕊*, 罗维中, 伏振兴

(宁夏师范大学 物理与电子信息工程学院, 宁夏 固原 756099)

摘 要: 为了研究拉盖尔-高斯光束耦合下闭合 V 型三能级系统的空间相关电磁感应透明, 基于密度矩阵理论建立系统哈密顿量与动力学方程, 并求得稳态解。进一步分析径向指数、轨道角动量方位指数、失谐以及相对相位对探测光空间吸收分布的调控作用。结果表明, 径向指数主要决定吸收在径向上的节点层级; 方位指数决定角向对称的模式; 失谐可连续调节电磁感应透明窗口的深度与对比度; 相对相位能够引起电磁感应透明在横向平面内的可控旋转与重构。研究为结构化光场驱动下的量子干涉调控及空间光信息处理提供了理论依据。

关 键 词: 拉盖尔-高斯光束; 电磁感应透明; 密度矩阵理论; 闭合 V 型三能级

中图分类号: O431.2

文献标识码: A

Closed V-type energy level with spatially-related electromagnetic induction transparency

LIU Birui*, LUO Weizhong, FU Zhenxing

(School of Physics and Electronic Information Engineering, Ningxia Normal University, Guyuan 756099, China)

Abstract: To study the spatially correlated Electromagnetically Induced Transparency (EIT) of a closed V-type three-level system under the coupling of Laguerre-Gaussian beams, the system Hamiltonian and dynamical equations were established based on the density matrix theory, and the steady-state solutions were obtained. Further, the influences of the radial index, the azimuthal index of the orbital angular momentum, detuning, and relative phase on the spatial absorption distribution of the probe light were analyzed. The results show that the radial index mainly determines the node hierarchy of the absorption in the radial direction; the azimuthal index determines the angularly symmetric mode; detuning can continuously adjust the depth and contrast of the EIT window; and the relative phase can cause the controllable rotation and reconstruction of the EIT in the transverse plane. This study provides a theoretical basis for the quantum interference control and spatial optical information processing driven by structured light fields.

Keywords: laguerre-gaussian beam; electromagnetic induction transparency; density matrix theory; closed V-shaped three-level system

0 引 言

电磁感应透明 (Electromagnetically Induced Transparency, EIT) 是一种重要的量子干涉现象, 使得原本不透明的介质在特定激光场作用下变得透明^[1], 广泛应用于慢光效应^[2-5]、量子存储^[6-8]和精

密测量^[9,10]等领域。EIT 研究多集中于原子或分子中的简单能级系统 (如 Λ 型, V 型或阶梯型能级), 通过耦合光场与探测光场的耦合实现量子干涉, 随着结构化光场例如拉盖尔-高斯光束 (Laguerre-Gaussian, LG) 等光束的发展, 空间相关 EIT 逐渐成为研究热点。结构化光场具有轨道角动量

收稿日期: 2026-01-08; 收到修改稿日期: 2026-02-10

基金项目: 宁夏自然科学基金项目 (2025AAC030603, 2025AAC030583)

作者简介: 刘碧蕊 (1969—), 女, 教授, 硕士, 从事量子光学与光子晶体研究。

* 通讯作者: 348546734@qq.com

(Orbital Angular Momentum, OAM) 等空间自由度^[11], 可调制光与物质的相互作用, 从而拓展EIT在空间维度上的应用。Wang等^[12]理论分析了带有拓扑荷数的LG光束在 Λ 型三能级EIT中的传播特性, 揭示了相位奇点的保持与分裂、聚焦-发散周期性等现象。Verma等^[13]研究 Λ 型EIT系统中引入微波场构成闭环, 利用LG光束全光生成携带轨道角动量的涡旋探测光束, 实现了高斯光束向空心高斯光束或涡旋光束的转换。Hao^[14]等将LG涡旋腔与冷原子四波混频体系耦合, 研究了光力学诱导透明在该混合系统中的表现, 发现原子OAM差异可调节透明窗口的幅度与相位, 实现快慢光切换。Samim等^[15]的综述系统比较了 Λ 、V、 Ξ 三类原子体系在使用LG光束时的EIT行为, 指出不同拓扑荷和径向指数对透明窗口宽度及相位奇点演化的细致影响。Manchaiah等^[16]在⁸⁷Rb体系中实验研究高阶LG耦合光对EIT等的影响, 发现随OAM拓扑荷增大, EIT共振线宽明显变窄, 并将其归因于LG横向强度分布导致的有效耦合拉比频率变化。与此同时, 微波场参与的EIT方案被用于实现相位可控的结构光生成与空间调制^[17,18], 这些工作为闭环相干路径引入额外可控自由度提供了依据。因此, 在LG耦合场与微波场共同作用下, 研究闭环V型体系中EIT的空间结构调控规律, 具有进一步完善相关理论并拓展空间光信息处理应用的意义。本研究围绕LG耦合场驱动的微波场辅助闭环V型三能级系统, 研究结构化光场作用下的空间相关EIT行为。在该方案中, 重点讨论方位指数、径向指数、失谐与相对相位等参量对非涡旋探测光吸收空间分布的影响规律与物理机制。数值结果表明, EIT窗口可在径向与角向呈现可设计的结构化分布, 并可通过相位实现吸收图样的可控旋转与重构, 为闭环量子干涉的空间调控及相关器件设计提供参考。

1 理论模型

如图1所示, 本研究构建一个非涡旋探测场、LG耦合场以及微波场辅助耦合的闭环V型三能级系统, 如图1所示。系统由三个能级组成, 分别用 $|1\rangle$, $|2\rangle$, $|3\rangle$ 标记。其中 $|1\rangle$ 是基态, $|2\rangle$, $|3\rangle$ 是激发态。

该系统是 $|2\rangle$ 和 $|3\rangle$ 两个激发态能级通过共同的基态 $|1\rangle$ 发生耦合, 在该系统中, 采用一个LG光束驱动 $|1\rangle \leftrightarrow |3\rangle$ 的跃迁通道。采用一个高斯探测场驱动另一条跃迁通道 $|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ 。能级 $|3\rangle \leftrightarrow |2\rangle$ 为电偶极禁戒跃迁, 用一个微波场实现相干耦合, 进而去构建一个闭环的三能级系统。本研究取三个场的

偏振相互正交, 以避免额外的多通道耦合。高斯探测场表示为

$$E_p(r, t) = E_p(r) e^{i(-\omega_p t + \phi_p)} + c.c. \quad (1)$$

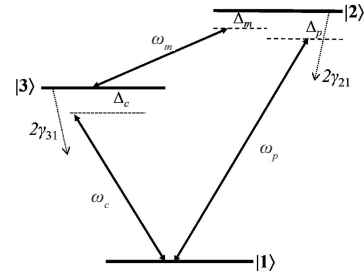


图1 闭合V型三能级系统图

式中, ω_p 是探测场的角频率; ϕ_p 是探测场的相位。辅助耦合的微波场表示为

$$E_m(t) = E_{m0} e^{i(-\omega_m t + \phi_m)} + c.c. \quad (2)$$

式中, E_{m0} 是微波场的振幅; ω_m 是微波场的角频率; ϕ_m 是微波场的相位。LG光束驱动的耦合场表述为

$$E_c(r, \theta, z, t) = E_c(r, \theta, z) e^{-i\omega_c t} + c.c. \quad (3)$$

式中

$$E_c(r, \theta, z) = E_{c0} \sqrt{\frac{2p!}{\pi(p+|l|)!}} \left(\frac{\sqrt{2}}{w^2(z)} \right)^{|l|} L_p^{(|l|)} \left(\frac{2r^2}{w^2(z)} \right) \exp\left(-\frac{r^2}{w^2(z)}\right) \exp(i l \theta) \exp(i \phi_c) \quad (4)$$

式中, E_{c0} 是振幅; ω_c 是耦合场的角频率; ϕ_c 是耦合场的相位。 p 表示径向指数; l 为方位指数; w 代表光束尺寸, 它在传播距离 z 处的大小由公式 $w = w_0 \sqrt{1 + (z/Z_R)^2}$ 给出。这里 w_0 是束腰半径, Z_R 为瑞利距离, $L_p^{(|l|)}$ 则为拉盖尔多项式。

根据光与物质相互作用的半经典理论, 采用密度矩阵方法求解系统的密度矩阵元。考虑闭环V型三能级系统, 在原始表象下的总哈密顿量为 $H = H_0 + H_i$, 通过旋转波近似和偶极近似, 相互作用哈密顿量可写成以下形式

$$H_i = -\frac{\hbar}{2} [\Omega_p e^{-i\omega_p t} |2\rangle \langle 1| + \Omega_c e^{-i\omega_c t} |3\rangle \langle 1|] - \frac{\hbar}{2} [\Omega_m e^{-i\omega_m t} |3\rangle \langle 2| + \text{H.c.}] \quad (5)$$

式中, H.c.表示对应项的厄米共轭。非涡旋探测场、LG耦合场以及微波场拉比频率的表达式分别为

$$\Omega_p = \frac{d_{21} E_p}{\hbar} \quad (6)$$

$$\Omega_c = \frac{d_{31} E_c}{\hbar} \quad (7)$$

$$\Omega_m = \frac{d_{32} E_m}{\hbar} \quad (8)$$

式中电偶极矩 d_{21} 、 d_{31} 和 d_{32} 分别对应于探测场、耦合场和微波场。在计入弛豫效应后, 该闭环三能级系统的动力学满足刘维尔方程

$$\dot{\rho} = -\frac{i}{\hbar} [H, \rho] + L \quad (9)$$

式中, ρ 是密度矩阵算符; L 是林德布拉德算子^[19], 用于描述系统中的所有弛豫机制。该闭合三能级 V 型系统的密度矩阵方程可写为

$$\dot{\rho}_{11} = \gamma_{21}\rho_{22} + \gamma_{31}\rho_{33} + \frac{i}{2}[\Omega_p^*\rho_{21} - \Omega_p\rho_{21}^* + \Omega_c^*\rho_{31} - \Omega_c\rho_{31}^*] \quad (10)$$

$$\dot{\rho}_{22} = -\gamma_{21}\rho_{22} + \gamma_{32}\rho_{33} + \frac{i}{2}[\Omega_p\rho_{21}^* - \Omega_p^*\rho_{21}] + \frac{i}{2}[\Omega_m^*\rho_{32} - \Omega_m\rho_{32}^*] \quad (11)$$

$$\dot{\rho}_{33} = -(\gamma_{31} + \gamma_{32})\rho_{33} + \frac{i}{2}[\Omega_c\rho_{31}^* - \Omega_c^*\rho_{31}] + \frac{i}{2}[\Omega_m\rho_{32}^* - \Omega_m^*\rho_{32}] \quad (12)$$

$$\dot{\rho}_{21} = -\left(\frac{\gamma_{21}}{2} + i\Delta_p\right)\rho_{21} + \frac{i}{2}\Omega_p(\rho_{11} - \rho_{22}) + \frac{i}{2}\Omega_m e^{-i\Phi}\rho_{31} - \frac{i}{2}\Omega_c\rho_{32}^* \quad (13)$$

$$\dot{\rho}_{31} = -\left(\frac{\gamma_{31}}{2} + i(\Delta_p + \Delta_2)\right)\rho_{31} + \frac{i}{2}\Omega_c(\rho_{11} - \rho_{33}) + \frac{i}{2}\Omega_m e^{+i\Phi}\rho_{21} - \frac{i}{2}\Omega_p\rho_{32} \quad (14)$$

$$\dot{\rho}_{32} = -\left(\frac{\gamma_{21} + \gamma_{31}}{2} + i\Delta_3\right)\rho_{32} + \frac{i}{2}\Omega_c\rho_{21}^* - \frac{i}{2}\Omega_p^*\rho_{31} + \frac{i}{2}\Omega_m(\rho_{22} - \rho_{33}) \quad (15)$$

$$\rho_{ij} = \rho_{ji}^* (i \neq j), \rho_{11} + \rho_{22} + \rho_{33} = 1 \quad (16)$$

式中, γ_{21} , γ_{31} 分别为能级之间辐射衰变率。此处辐射衰变率的设置如下: 两个光学跃迁的辐射衰变率取为相同, 即 $\gamma_{21} = \gamma_{31} = \gamma/2$ 。其中失谐量 $\Delta_p = \omega_p - \omega_{21}$, $\Delta_c = \omega_c - \omega_{31}$, $\Delta_m = \omega_m - \omega_{32}$ 分别表示探测场失谐, 耦合场失谐和微波场失谐。 $\Delta_2 = \Delta_p - \Delta_c$ 和 $\Delta_3 = \Delta_p - \Delta_c - \Delta_m$ 表示双光子失谐和三光子失谐。 $\Phi = \phi_p - \phi_c - \phi_m$ 表示系统的相对相位。

在弱探测场的状态下, 体系的密度矩阵方程可在一阶近似下线性化处理, 取初始时刻所有粒子全部布居在基态 $|1\rangle$, 即 $\rho_{11} = 1$, $\rho_{22} = \rho_{33} = 0$ 。在上述近似下, 对密度矩阵方程进行求解, 求与探测场响应直接相关的相干项, 可得到矩阵元 ρ_{21} 的稳态解为

$$\rho_{21} = \frac{2i\left(\frac{\gamma_{31}}{2} + i(\Delta_p + \Delta_2)\right)\Omega_p - \Omega_m^*\Omega_c e^{-i\Phi}}{4\left(\frac{\gamma_{21}}{2} + i\Delta_p\right)\left(\frac{\gamma_{31}}{2} + i(\Delta_p + \Delta_2)\right) + |\Omega_m|^2} \quad (17)$$

再结合探测跃迁线性极化率 χ 的表达式

$$\chi = \frac{2Nd_{21}^2}{\epsilon_0 \hbar \Omega_p} \rho_{21} \quad (18)$$

式中, N 表示原子数密度; ϵ_0 为真空介电常数。吸收系数 $\alpha = k_p \text{Im}[\chi]$, k_p 为探测光波数, 介质对探测光的吸收与极化率 χ 的虚部成正比。所以通过稳态解可得到探测光的吸收, 探测场吸收其空间分布由稳态解决定, 调控闭环能级系统的参数, 闭环结构中的量子干涉会导致 EIT 窗口的出现, 从而实现对非涡旋探测光吸收响应的灵活控制。

2 研究与讨论

本研究选取 ^{87}Rb 原子作为三能级 V 型系统的物理实现载体, 重点分析束腰平面 $z=0$ 处横截面的空间分布特性, 以下所有与空间相关的 EIT 结果均在 $z=0$ 平面上计算与讨论。设定系统参数如下: $\gamma = 2\pi \times 6 \text{ MHz}$, $\Omega_p = 0.01\gamma$, $\Omega_m = 0.1\gamma$, $\lambda_p = 780 \text{ nm}$, $\lambda_c = 795 \text{ nm}$, $N = 1 \times 10^{12} \text{ atoms/cm}^3$ 。通过固定其他参数、单一变量调控的方式, 系统研究径向指数 p 、OAM 对应的方位指数 l 、失谐 Δ_2 及相对相位 Φ 对探测光空间吸收特性的调制作用。

2.1 径向指数对探测光空间吸收特性的影响

径向指数 p 是表征 LG 光束径向模式的核心参数, 其取值决定了光束径向强度分布的节点数量。本小节固定 $l=3$ 、 $\Delta_2=0$ 、 $\Delta_p=0$ 、 $\Phi=0$, 通过改变径向指数 $p=0, 1, 2, 3$ 研究其对探测光空间吸收分布与 EIT 分布形态的调控机制。

如图 2 所示, 当 $p=0$ 时, LG 光束径向强度分布无节点, 呈现中心对称的角向多瓣结构, 对应的探测光吸收图谱表现为单环对称分布, 吸收最小值 (EIT 窗口) 集中在径向中心区域。随着 p 的增大, 探测光吸收分布在径向方向出现更丰富的节点层次, 透明与吸收增强区域交替出现, 吸收图谱的径向节点数同步增加, 吸收强度呈现周期性的强弱交替分布。这一现象的物理本质是: 径向指数 p 的增大导致拉盖尔多项式的振荡频率增加, LG 光束径向强度分布的空间调制周期减小, 进而通过光与物质相互作用的空间依赖性调控原子系统的量子干涉效率, 在光束强度较强的区域, 耦合作用增强, 量子干涉效应更显著, 探测光吸收减弱; 而在光束强度为零的节点区域, 耦合作用消失, 量子干涉效应被抑制, 探测光吸收增强。上述结果表明, 径向指数 p 实现了对空间相关 EIT 窗口在径向上的调控。

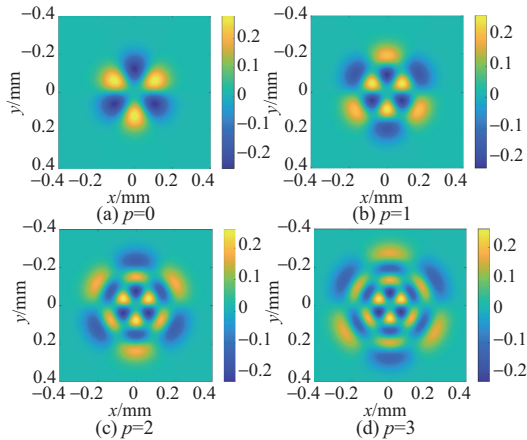


图2 $p=0,1,2,3, \Delta_2=0, \Delta_p=0, \Phi=0, z=0$ 时的空间相关的探测吸收分布图

2.2 OAM对探测光空间吸收特性的影响

轨道角动量 (OAM) 是结构化光场独特的空间自由度, 其对应的方位指数 l 决定了LG光束的角向相位分布 $\exp(-il\phi)$ 。固定 $p=0, \Delta_2=0, \Delta_p=0, \Phi=0$, 通过改变方位指数 $l=1,2,3,4$ 分析OAM对探测光空间吸收特性与EIT分布形态的调制规律。

如图3所示, OAM的方位指数 l 对探测光吸收的角向分布具有显著调控作用。吸收分布的角向结构随增大而呈现瓣叶数增加、角向节点增多的规律: $l=1$ 时主要为二瓣结构, $l=2$ 时演化为四瓣结构, $l=2$ 与 $l=3$ 时分别对应更高阶的多瓣角向调制。该现象本质为: 耦合场的螺旋相位使得体系在不同方位角处经历不同的有效相位条件, 从而使相干调制在角向方向呈现周期性分布; 当 l 增大时, 角向相位变化速率提高, 导致闭环EIT在角向方向的调制空间频率升高, 从而在吸收图样上体现为更多的角向节点与更细的角向结构。由此可知, 方位指数 l 提供了对探测光吸收和空间相关EIT窗口的角向分布的直接调控途径。

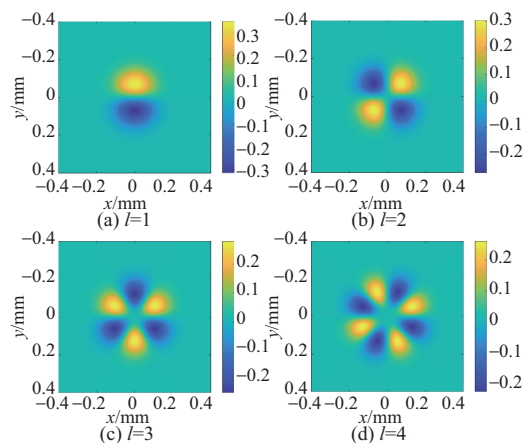


图3 $l=1,2,3,4, p=0, \Delta_2=0, \Delta_p=0, \Phi=0, z=0$ 时的空间相关的探测吸收分布图

2.3 失谐对探测光空间吸收特性的影响

系统中的失谐 Δ_2 是调控光与物质量子干涉强度的核心参数。固定 $p=0, \Delta_p=0, l=3, \Phi=0$, 通过改变失谐 $\Delta_2=0,0.3,0.4,0.5$ 研究其对探测光空间吸收特性与EIT分布形态的影响。

模拟结果如图4所示, 当 $\Delta_2=0$ 时, 耦合场与原子能级实现共振耦合, 量子干涉效应达到最强, 探测光吸收图谱呈现最深的EIT窗口, 吸收强度降至最低, 且空间分布的对比度 (吸收最大值与最小值的比值) 最高。随着 Δ_2 的增大, 探测光的整体吸收强度逐渐增强, EIT窗口深度持续变浅, 空间分布的对比度显著降低, 且EIT窗口几乎消失, 探测光吸收呈现均匀增强的空间分布。这一现象的物理机制为: 偏离两光子共振会破坏相干干涉条件, 使透明窗口逐渐变弱, 最终使空间相关的EIT调制趋于平缓。上述结果表明, 失谐 Δ_2 可有效调控空间相关EIT的强度与调制深度。

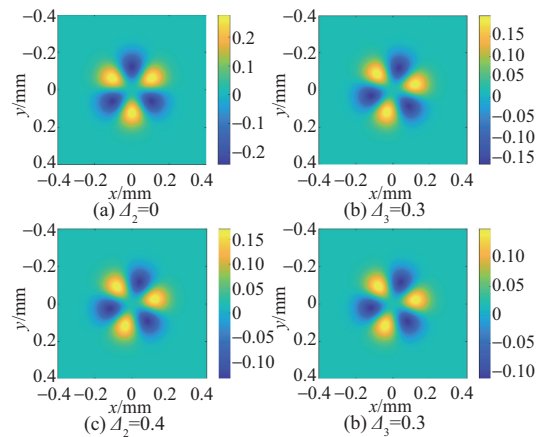


图4 $\Delta_2=0,0.3,0.4,0.5, p=0, \Delta_p=0, l=3, \Phi=0, z=0$ 时的空间相关的探测吸收分布图

2.4 相对相位对探测光空间吸收特性的影响

相对相位 Φ 是能级系统的重要参数, 其变化直接改变原子系统量子干涉的相位匹配条件, 进而影响EIT的空间分布。本小节固定 $p=0, l=3, \Delta_2=0, \Delta_p=0$, 通过改变相对相位 $\Phi=\pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi$ 研究相位自由度对探测光空间吸收特性与EIT分布形态的调制作用。

由图5可见, 当 Φ 改变时, 吸收分布的整体形状与对称性基本保持, 但吸收极小值 (透明增强区) 与吸收极大值 (吸收增强区) 在方位角方向发生系统性的整体移动, 表现为整个图样随 Φ 发生可控旋转。但其角向取向发生系统性的旋转: 不同 Φ 下的瓣叶结构相对坐标轴呈现不同转角, 对应EIT窗口在方位角上整体平移。这说明相对相位主要通过改变闭环相干叠加条件来调控吸收的角向位置, 而不是简单改变径向节点数或改变

图样类型。该现象表明： Φ 并未主要通过改变耦合场强度来影响吸收，而是通过改变闭环干涉的相位匹配条件来重排EIT窗口的位置，从而实现EIT窗口空间位置的相位可控调制。因而， Φ 可用于实现EIT窗口位置在横向平面内的可控旋转与重构的调控方式。

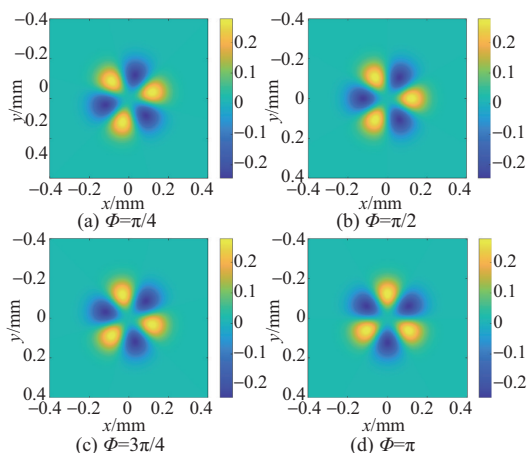


图5 $\Phi=\pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi, p=0, l=3$, $\Delta_2=0, \Delta_p=0, z=0$ 时的空间相关的探测吸收分布图

3 结 论

本文研究了LG耦合场驱动的微波场辅助闭环V型三能级系统中的空间相关EIT现象。基于密度矩阵理论与数值计算，系统揭示了探测光空间吸收的调控规律：径向指数 p 决定径向节点层级与多环结构；方位指数 l 决定角向对称性与多节点分布，从而实现角向结构化调制；失谐参数改变相干干涉条件，可连续调节EIT窗口的深度与空间对比度；相对相位通过闭环干涉的相位匹配，使透明增强区在横向平面内发生可控旋转与重构。由此得出，闭环型系统中，EIT在空间上的分布由LG耦合场的空间结构与闭环系统中的失谐和相位共同调控。上述结果加深了对闭环能级体系中空间量子干涉机制的理解，并为结构化光场驱动的存储、空间光信息处理及相关量子光学器件的设计提供了理论依据。

参考文献：

- [1] Fleischhauer M, Imamoglu A, Marangos J P. Electromagnetically induced transparency: optics in coherent media[J]. Reviews of Modern Physics, 2005, 77(3): 633—677.
- [2] Zhang J, Hernandez G, Zhu Y. Slow light with cavity electromagnetically induced transparency[J]. Optics Letters, 2008, 33(1): 46—48.
- [3] Zhao Y, Huang Q P, Cai H L, et al. Ultrafast control of slow light in THz electromagnetically induced transparency metasurfaces[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(7): 073602.
- [4] Clementi M, Galli M, O'Faolain L, et al. Electromagnetically induced transparency from first-order dynamical systems[J]. Physical Review B, 2021, 104(20): 205434.
- [5] Huang W, He N Y, Ning R X, et al. Multi-Band Analogue Electromagnetically Induced Transparency in Double-Tuned Metamaterials[J]. Nanomaterials, 2021, 11: 2793.
- [6] Ma L, Slattery O, Tang X. Optical quantum memory based on electromagnetically induced transparency[J]. Journal of Optics, 2017, 19(4): 043001.
- [7] Chen H J. Two-color electromagnetically induced transparency generated slow light in double-mechanical-mode coupling carbon nanotube resonators[J]. iScience, 2024, 27(4): 109328.
- [8] Chu K I, Lu X C, Chiang K H, et al. Slow and stored light via electromagnetically induced transparency using an A-type superconducting artificial atom[J]. Physical Review Research, 2025, 7(1): L012015.
- [9] Wang C, Jiang X, Zhao G, et al. Electromagnetically induced transparency at a chiral exceptional point[J]. Nature Physics, 2020, 16(3): 334—340.
- [10] Holloway C L, Prajapati N, Sherman J A, et al. Electromagnetically induced transparency based Rydberg-atom sensor for traceable voltage measurements[J]. AVS Quantum Science, 2022, 4(3): 034401.
- [11] Chann S R, Natarajan V. Narrowing of resonances in electromagnetically induced transparency and absorption using a Laguerre-Gaussian control beam[J]. Optics Communications, 2013, 295: 150—154.
- [12] Wang Y, Guo M, Wu J, et al. Propagation of Gaussian vortex beams in electromagnetically induced transparency media[J]. Optics Express, 2022, 30(24): 43426—43438.
- [13] Verma O N, Kant N. All-optical generation of structured light beams via microwave-field-controlled electromagnetically induced transparency[J]. Physical Review A, 2024, 110(1): 013701.
- [14] Hao Y T, Liu Y M. Optomechanically induced transparency in a Laguerre-Gaussian vortex cavity system assisted by a four-wave-mixing atomic ensemble[J]. Physical Review A, 2025, 112(2): 023523.
- [15] Akhtar S, Saha J K, Hossain M M. A comparative study of electromagnetically induced transparency (EIT) in Λ -, V-, and Ξ -type systems using Laguerre-Gaussian (LG) laser beams[J]. Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials, 2025, 34(2): 2350082.
- [16] Antón M A, Cabrera-Granado E. All-optical generation of structured light via microwave-field-controlled spontaneous emission[J]. Optics Communications, 2025, 591: 132128.
- [17] Jiang H, Xu H, Ba N, et al. Optical vortex transfer via four-wave mixing in an electromagnetically induced transparency system[J]. Optics Communications, 2025, 581: 131609.
- [18] Manchiaiah D, Kumar R, Chauhan V S, et al. Impact of higher-order Laguerre-Gaussian modes on electromagnetically induced transparency resonances in 87Rb atomic vapor medium[J]. Journal of Optics, 2025, 54(5): 3147—3156.
- [19] Lindblad G. On the generators of quantum dynamical semi-groups[J]. Communications in Mathematical Physics, 1976, 48(2): 119—130.