arXiv:2602.11682v1 [physics.atom-ph] 12 Feb 2026

# 里德堡电磁诱导透明中的合成规范相位

Ya-Dong Hu、[1、2、*]Yi-Chen Zhang、[1、2、*]Qing-Xuan Jie、[1,2]Hong-Jie Fan、[1,2]Xiao-Kang Zhong、[1,2]Dong-Qi Ma、[1,2]Ya-Nan Lv、[1,2]Yan-Lei Zhang、[1,2,3]Xu-Bo Zou、[1,2,3]Song-Bai Kang、[4]Guang-Can Guo、[1,2,3]Zhu-Bo Wang、[1,2,†]以及 Chang-Ling Zou[1,2,3,‡]

[1]量子信息实验室，中国科学技术大学，中国安徽合肥 *230026*[2]中国科学院量子信息与量子物理卓越创新中心，中国科学技术大学，中国安徽合肥 *230026*[3]合肥国家实验室，中国科学技术大学，中国合肥 *230088*。[4]精密测量科学与技术创新研究院，中国科学院，中国武汉 *430071*（日期：2026年2月13日）

我们利用室温铷蒸气，展示了里德堡电磁感应透明（EIT）中的合成规范相位。通过利用涉及基态、中间态和里德堡态的阶梯型系统中的偏振选择定则，多个塞曼子能级形成了能够获得规范相位的闭环跃迁。我们表明，线偏振探测激光与耦合激光之间的相对偏振角可直接控制该规范相位，进而调制电磁诱导透明透射和里德伯态布居，并因此控制原子间里德堡偶极-偶极相互作用导致的电磁感应透明线宽。我们的方法仅基于偏振，简单易行，可用于实现合成规范物理并调控原子系综中的多体相互作用，无需激光冷却和偶极阱。

*1.* 引言.- 自 20 世纪 90 年代以来， [1] 原子系综中的电磁感应透明（EIT） [2–4]一直备受关注，并成为研究光-物质相互作用的量子光学基石。EIT 是一种量子干涉现象：强控制场耦合到辅助跃迁，从而抑制共振探测光束的吸收。其基本机制是不同激发路径之间的相消干涉，由此形成狭窄的透明窗口，并伴随色散的急剧调制。当光-原子相互作用从单个原子扩展到原子系综时，EIT 会产生集体现象，探测光子与集体原子激发（如自旋波）耦合。不传播且具有长相干时间的自旋波使相干信息存储成为可能 [2–4]，并大幅降低光的群速度 [5]。EIT 作为相干干涉现象具有普适性，其应用已扩展至多种物理平台，包括光机械系统 [6], 、超导量子电路 [7], 、固态缺陷 [8], 和等离激元纳米结构 [9]。

教科书对电磁感应透明的处理通常采用简化的三能级模型。然而，真实原子具有丰富的内部结构，包含多个超精细和塞曼子能级，从而为沿两个互补方向拓展电磁感应透明物理提供了机会。首先，将高度激发的里德伯态纳入阶梯方案会引入强的长程偶极-偶极相互作用。这一里德堡电磁感应透明平台揭示了引人入胜的多体现象，包括偶极阻塞 [10], 单光子非线性 [11],以及光学双稳态 [12], ，从而确立原子作为量子模拟 [13–20] 和电场测量 [21–23]的有力介质。其次，多能级结构本身使多条相干路径能够连接相同的初态和末态。当激发路径形成闭合回路时，另一种干涉效应便源于回路周围累积的相位，它构成一种合成规范相位 [24–29], ，类似于带电粒子环绕磁通量时所获得的阿哈罗诺夫-玻姆相位。与需要将超冷原子置于光学晶格和光镊阵列中的传统合成规范场不同 [26, 30–32], ，此类内部态回路为在简单原子系综中研究规范物理提供了另一条途径。

在本研究中，我们通过同时利用这两种拓展——里德堡相互作用以及塞曼子能级之间的闭环跃迁——展示了里德堡电磁感应透明中的合成规范相位。在室温铷蒸气中，我们表明，线偏振探测光与耦合激光之间的相对偏振角可直接控制规范相位。随着该角度变化，我们观察到电磁感应透明透射强度和线宽均呈正弦振荡，为规范相位提供了直接证据。这一机制提供了一个额外的控制参数，可通过电磁感应透明干涉调制里德堡态布居，进而控制里德堡原子间偶极-偶极相互作用的强度。通过简单的偏振控制实现规范相位，为探索原子系综中的新现象和应用提供了一个调控手段。

*2.* 模型。图1(a) 展示了里德堡电磁感应透明的菱形能级图，其中探测激光和耦合激光同时通过两个中间态 $|g\rangle$ 耦合基态$|r\rangle$和里德堡态 $|e_1\rangle$。 $|e_2\rangle$两条阶梯型电磁感应透明跃迁会产生干涉，也就是说，探测激光的吸收和产生的里德堡态布居会根据两条路径之间的相对相位发生相消或相长干涉。等效地，菱形结构的里德堡电磁感应透明会形成一个跃迁回路，并在回路中产生合成磁通量，进而调控能级间的布居转移。系统的动力学可以描述为

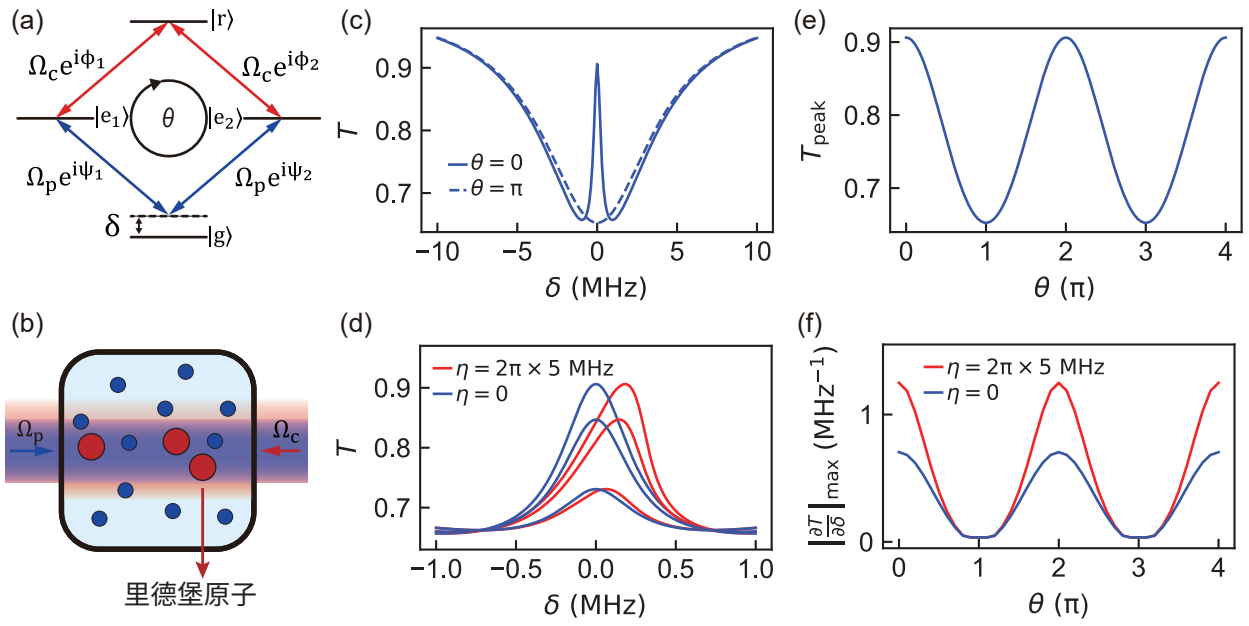


图 1。（a）里德堡电磁感应透明的菱形能级构型，闭环跃迁中累积的合成规范相位为 $\theta$。（b）蒸气室中反向传播的探测激光和控制激光与里德堡原子系综相互作用的示意图。（c） $\theta = 0$（实线）和 $\theta = \pi$（虚线）的透射（$T$）光谱。（d）对于 $\theta = 0,\ 0.3\pi,\ 0.6\pi$（从上到下），存在（红线）和不存在（蓝线）里德堡相互作用时的电磁感应透明光谱。（e）电磁感应透明透射峰随 $\theta$ 的变化。（f）存在（红线）和不存在（蓝线）里德堡相互作用时，最大透射斜率随 $\theta$ 的变化。

哈密顿量

$$\mathcal{H} = \delta_{\text{eff}} |g\rangle\langle g| + \Omega_p \left(e^{i\psi_1} |e_1\rangle\langle g| + e^{i\psi_2} |e_2\rangle\langle g|\right) + \Omega_c \left(e^{i\phi_1} |r\rangle\langle e_1| + e^{i\phi_2} |r\rangle\langle e_2|\right) + \text{H.c.}. \quad (1)$$

这里， $\Omega_p$ 和 $\Omega_c$ 分别是探测激光和耦合激光的拉比频率，在以下模拟中分别设为 $2\pi\times10$ kHz 和 $2\pi\times100$ kHz。该系统的合成规范相位 $\theta$ 定义为驱动场沿闭环累积的相位： $\theta = \phi_2 - \phi_1 + \psi_2 - \psi_1$。在模拟中，我们将 $\phi_2$、 $\psi_1$ 和 $\psi_2$ 设为 0，并通过 $\phi_1$ 控制规范相位。相关退相干过程由林德布拉德项 $\mathcal{L} = \{\kappa_e |g\rangle\langle e_1|$、 $\kappa_e |g\rangle\langle e_2|$、 $^{\kappa}r_2 |e_1\rangle\langle r|$、 $^{\kappa}r_2 |e_2\rangle\langle r|\}$ 描述。这里， $\kappa_e$ 和 $\kappa_r$ 分别表示中间态和里德伯态的衰减率。在模拟中，我们设定 $\kappa_e = 2\pi\times1.2$ MHz 和 $\kappa_r = 2\pi\times10$ kHz。为研究里德堡相互作用对合成规范相位的影响，我们引入平均场理论 [33]，以简化原子系综中的多体动力学。该模型引入平均场位移 $\delta_{\text{eff}} = \delta + \eta\rho_{rr}$，其中包含一项与里德堡态布居 $\rho_{rr}$ 成正比的项，其系数为 $\eta$。

我们基于主方程的稳态解数值计算了探测光的透射（图 1(b)），有效原子密度由 $^{87}$Rb 在 370K 时的饱和蒸气压推导得到。当 $\theta = 0$ 和 $\eta = 0$时，系统呈现出标准的阶梯型电磁感应透明结构，在宽吸收谷中出现一个狭窄的透明窗口，如图 1(c) 所示。当 $\theta = \pi$时，透明窗口消失。随着我们更精细地调节规范相位，图 1(d) 中的结果显示，透射峰值逐渐变化。在图 1(e) 中，我们提取了电磁感应透明窗口的透射峰 $T_{\text{peak}}$，其呈现正弦振荡，且 $\theta$。此外，图 1(d) 比较了系统存在和不存在里德堡相互作用时的结果。我们发现，当里德堡相互作用强度非零时（此处设为 $\eta = 2\pi\times5$MHz），哈密顿量变为非线性，导致透射线型不对称，并使共振频率发生偏移。我们通过计算透射 $|\partial T/\partial\delta|_{\text{max}}$的最大斜率来表征非线性效应。图 1(f) 显示，当相互作用强度非零时，最大斜率随规范相位 $\theta$变化而振荡，且振幅更大，这表明规范相位与原子间相互作用之间存在相互影响。

3. 实验装置。图2(a)展示了用于研究 $^{87}$Rb原子蒸气（370 K）中里德堡电磁感应透明的实验装置。该装置由两个激光光源组成：一束较弱的420纳米探测激光，将基态 $|g\rangle = |5S_{1/2}, F = 2\rangle$ 耦合至中间态 $|e\rangle = |6P_{3/2}, F = 3\rangle$；以及一束较强的1013纳米耦合激光，驱动 $|e\rangle$ 与里德堡态 $|r\rangle = |70S_{1/2}\rangle$之间的跃迁，相应的能级图如图2(b)所示。探测激光束直径为1.5 mm，功率为1 mW；耦合光束直径为2.7 mm，功率$P_c$可在16至190 mW之间调节。

尽管存在许多塞曼子能级，探测激光与耦合激光仍可同时耦合到这些能级。当两束激光均为线偏振时，每束激光都可以

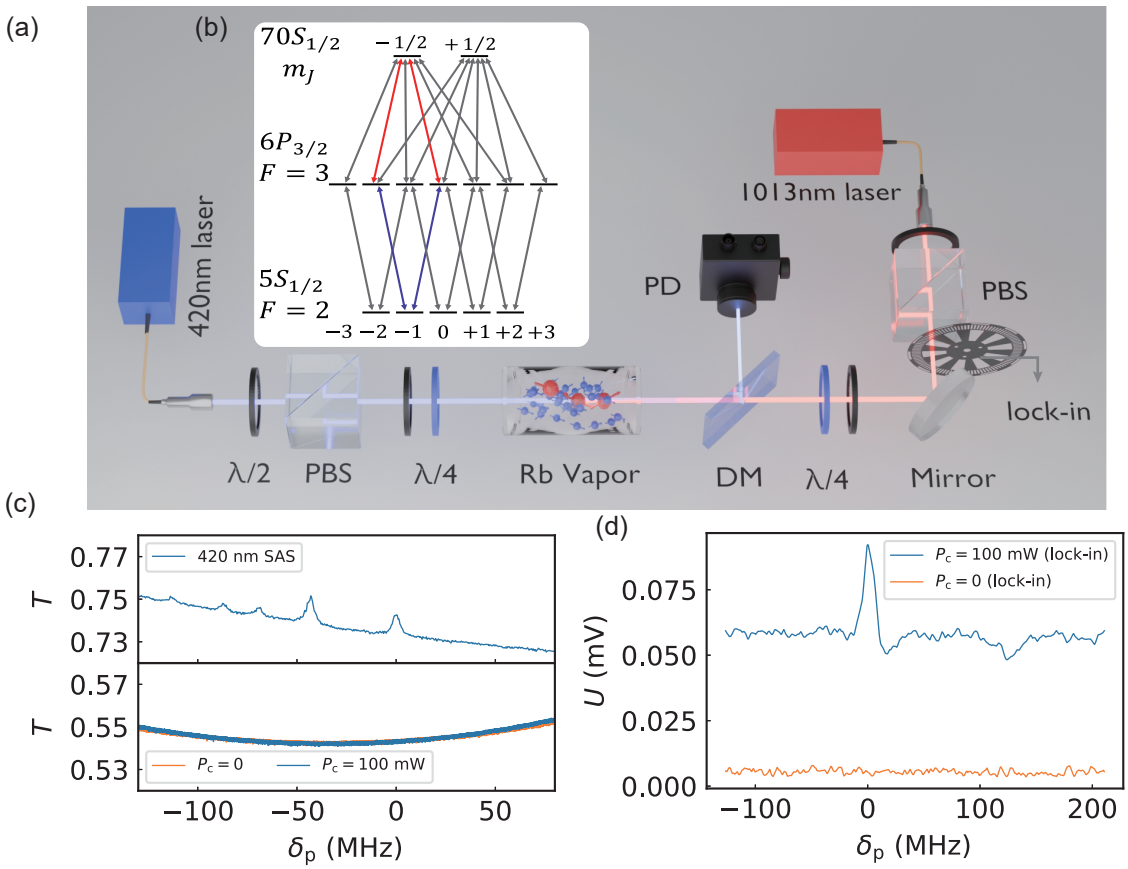


图 2. (a) 实验装置示意图。PBS：偏振分束器；HWP：半波片；QWP：四分之一波片；DM：二向色镜；PD：光电二极管。(b) 铷原子的相关能级。(c) 扫描探测激光失谐（$\delta_p$），分别在有耦合激光和无耦合激光（$P_c$ =100mW）时测得的饱和吸收光谱（SAS）（上）和探测光吸收曲线（下）。(d) 电磁感应透明光谱随探测激光失谐的变化；耦合激光频率锁定在 $\left|6P^{3/2},F=3\right\rangle \rightarrow \left|70S_{1/2}\right\rangle$ 跃迁上。通过锁相放大检测电磁感应透明信号：对耦合激光施加调制，同时固定耦合激光频率和探测激光强度。探测激光和耦合激光的功率分别为 1 mW 和 100 mW（0 mW），偏振分别为水平偏振和左旋圆偏振。电磁感应透明信号以电压 $U$ 的形式采集。

分解为左旋（$\sigma^-$）和右旋圆偏振（$\sigma^+$分量的叠加。根据跃迁选择定则，存在一些闭合回路，其中由 $\sigma^+$-$\sigma^-$或 $\sigma^-$-$\sigma^+$级联的探测—耦合跃迁可以发生干涉，如图 2(b) 中红色和蓝色箭头所示。这样，两束线偏振激光可以同时形成许多闭合回路，且这些闭合回路获得相同的合成规范相位 $\theta$，该相位由探测场与耦合场之间的相对偏振角决定。为实现精确的偏振控制，我们使用偏振分束器（PBS）净化两束光的初始偏振态。随后，半波片（HWP）可连续旋转线偏振方向，而四分之一波片（QWP）则可切换至圆偏振，以进行对照实验。两束光反向传播通过加热蒸汽池，随后由二向色镜（DM）分离。透射的探测信号（$U$）由硅雪崩光电二极管检测

（光电二极管）。

为研究里德堡电磁感应透明，我们首先通过饱和吸收光谱（饱和吸收光谱）校准探测激光失谐 [34]，，如图2(c)上图所示。然而，对于较弱的跃迁，无法直接探测到电磁感应透明信号 [图2(c)下图]。因此，我们采用锁相放大技术 [35]，，通过声光调制器对耦合激光施加 130kHz 的振幅调制，并提取透射光的调制信号，从而提高电磁感应透明信号的信噪比。图2(d)展示了实验观测到的里德堡电磁感应透明光谱，$P_c$ =100mW；其中探测光为水平（H）偏振，耦合光为圆偏振，以避免形成跃迁闭合回路。这里，电磁感应透明光谱呈现出明显的不对称性，这归因于原子间的里德堡相互作用 [21]，，与图1(d)中的预测一致。

*4.* 规范相位。-利用这一实验装置，我们系统-

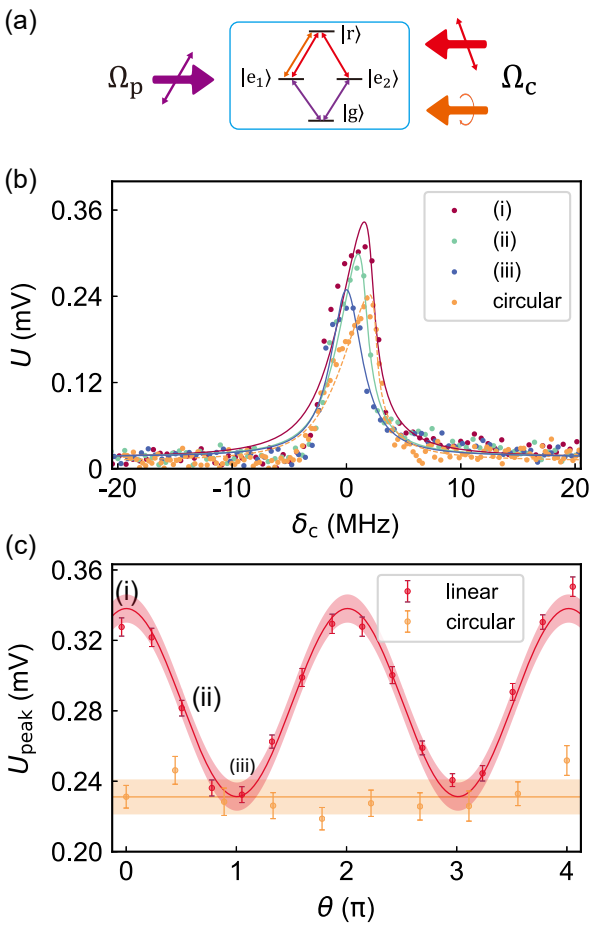


图3。(a) 能级图，展示线偏振探测光（紫色）以及线偏振（红色）或左旋圆偏振（橙色）耦合场激发的情况。(b) 耦合激光与探测激光的线偏振方向呈（i）平行（H-H）、（ii）中间角度和（iii）垂直（H-V）时的电磁感应透明光谱，以及图示的圆偏振耦合激光对应的电磁感应透明光谱。(c) 电磁感应透明峰值振幅（$U_{peak}$）随规范相位 $\theta$ 的变化；该相位定义为耦合激光与探测激光之间相对偏振角的两倍。

系统研究了里德堡电磁感应透明的偏振依赖性，以揭示合成规范相位。图3(a)展示了用于验证规范相位的探测激光和控制激光偏振状态。将探测激光固定为 H 偏振后，我们使用电动半波片系统地旋转线偏振耦合激光的角度，并记录每个角度下的电磁感应透明光谱；这与图3(b)中的结果形成对比，后者的耦合光为圆偏振。如图3(b)所示，曲线 (i)–(iii) 分别对应控制光与探测光偏振方向夹角为 0（平行，H 偏振）、 $\pi/4$和 $\pi/2$ （垂直，V 偏振）时的结果；夹角越小，电磁感应透明峰值越弱。

这种调制证实，相对偏振角决定了电磁诱导透明透射。根据图1(a) 所示的跃迁，我们推导出规范相位为 $\theta$ 它等于两束线偏振激光之间夹角的两倍，与探测激光或耦合激光的偏振方向无关。因此，对于平行偏振， $\theta = 0$ 因为从基态到里德堡态的两条跃迁路径具有相同的相位；而对于垂直偏振， $\theta = \pi$两条跃迁路径则会发生相消干涉。

通过仔细扫描角度，我们测得电磁感应透明峰值电压随规范相位 $\theta$ 的变化关系。如图 3(c) 所示，实验数据呈现正弦振荡，并与理论预期一致。为明确验证观测到的振荡源于闭环跃迁几何结构，我们进行了一项实验：将输入耦合激光从初始的线偏振切换为右旋圆偏振，同时旋转线偏振探测激光的方向。随后，电磁感应透明峰值对规范相位的依赖可以忽略不计，这证实了合成规范相位是由两束线偏振激光诱导的闭环跃迁产生的。

图中研究了原子间里德堡相互作用的特征。4。首先，对于图3所示的构型，当两个输入均为线偏振时，电磁感应透明线宽也随规范相位呈正弦振荡；而当控制激光为圆偏振时，从实验数据中几乎看不到这种振荡。线宽与电磁感应透明峰值的同步振荡证实，原子系综中更高的里德堡布居会导致跃迁展宽。图4(b)中，我们通过增大 $P_c$ （从 16 mW 增至 190 mW），考察电磁感应透明线型峰值与线宽之间的相互作用；其中探测激光与耦合激光均为 H 偏振。随着$P_c$ 增大，峰值变得更加显著，线宽也随之增宽。

图4(c)通过比较不同耦合功率下 $\theta = 0$ （平行偏振）和 $\theta = \pi$ （垂直偏振）时的电磁感应透明透射，研究了合成规范相位对里德堡相互作用的影响。在整个功率范围内， $\theta = 0$ 情形始终呈现更高的透射；在里德堡相互作用更强的高功率区间，这种影响更加显著。图4(d)更定量地展示了电磁感应透明中由里德堡相互作用诱导的非线性不对称光谱响应，即最大斜率$|\partial T/\partial\delta|_{max}$。结果显示，该响应随 $\theta$呈现明显的正弦调制，验证了图1(f)中的理论预测，并表明规范相位能够主动调控有效里德堡非线性。

*5.* 结论。- 我们在铷原子系综的里德堡跃迁中实现了合成规范相位。该规范相位可调制里德堡电磁感应透明光谱的谱线轮廓，并仅通过改变激光线偏振方向即可有效调控里德堡非线性，无需改变激光强度或频率。采用圆偏振耦合激光开展的实验验证了，闭环跃迁对于观察到这种对规范相位的依赖至关重要。因此，我们的工作揭示了偏振

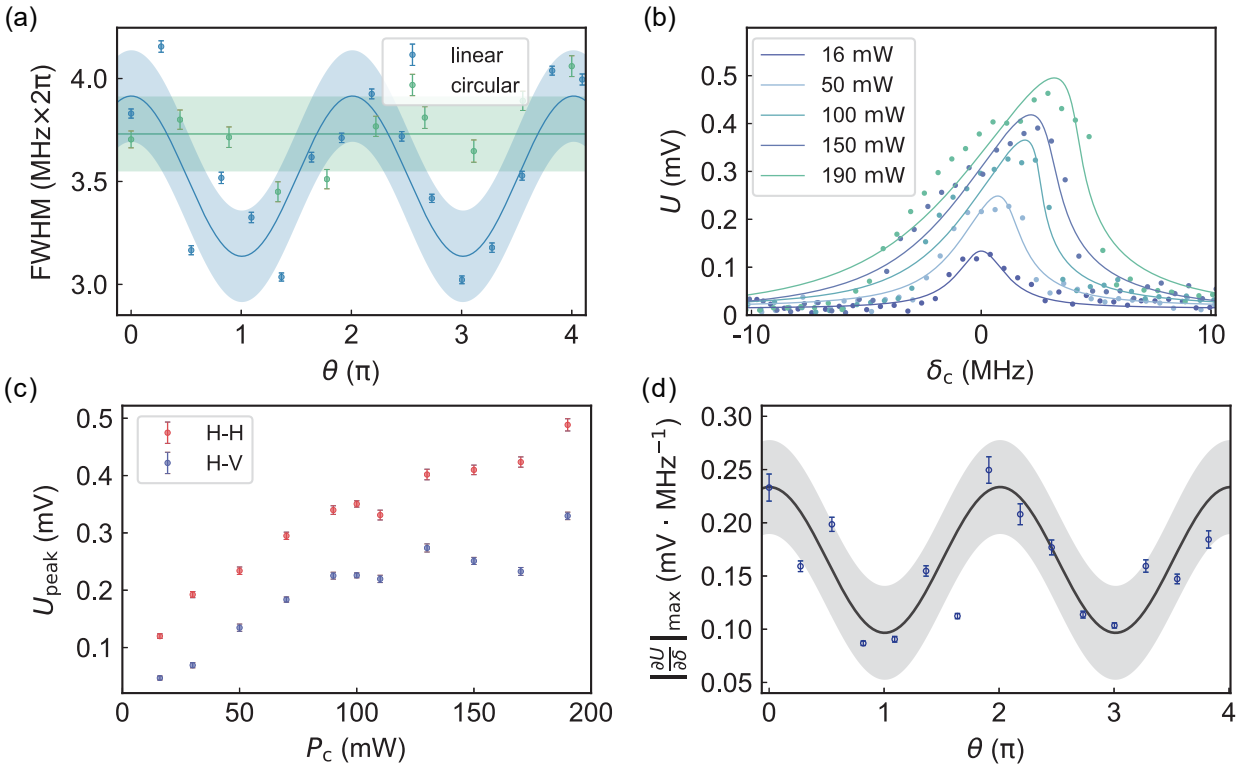


图4. (a) 线偏振（蓝色）和圆偏振（红色）耦合激光下，电磁感应透明线宽随 $\theta$ 的变化。(b) 不同耦合激光功率$P_c$下的里德堡电磁感应透明光谱（H-H偏振构型）。(c) 平行（H-H，蓝色）和垂直（H-V，红色）偏振构型下，里德堡电磁感应透明峰值透射率随$P_c$ 的变化。(d) 最大光谱斜率随 $\theta$的变化。

可作为一种实验控制旋钮，用于调控光-物质相互作用和里德堡原子间相互作用。这种合成规范相位为探索量子模拟和拓扑现象 [13–20, 36]。

**致谢**

本工作由国家重点研发计划（项目编号：2021YFA1402004）、安徽省自然科学基金（项目编号：2408085QA017）以及国家自然科学基金（项目编号：92465201和12504569）资助。Y.-N.L.还得到中国博士后科学基金（项目编号：2024M753081）的支持。本工作还得到中央高校基本科研业务费和中国科学技术大学“双一流”建设研究基金的支持。本文的数值计算在中国科学技术大学超级计算中心的超级计算系统上完成。本工作的部分内容在中国科学技术大学微纳研究与制造中心完成。

* 这两位作者对本工作的贡献相同。† zbwang@ustc.edu.cn ‡ clzou321@ustc.edu.cn[1] K.-J. Boller、A. Imamo˘glu 和 S. E. Harris，“电磁感应透明的观测”，《物理评论快报》66，2593（1991）。[2] M. Fleischhauer 和 M. D. Lukin，“电磁感应透明中的暗态极化激元”，《物理评论快报》84，5094（2000）。[3] D. F. Phillips、A. Fleischhauer、A. Mair、R. L. Walsworth 和 M. D. Lukin，“原子蒸气中的光存储”，《物理评论快报》86，783（2001）。[4] Y. Wang、J. Li、S. Zhang、K. Su、Y. Zhou、K. Liao、S. Du、H. Yan 和 S.-L. Zhu，“单光子偏振量子的高效量子存储器”，《自然·光子学》13，346（2019）。[5] M. M. Kash、V. A. Sautenkov、A. S. Zibrov、L. Hollberg、G. R. Welch、M. D. Lukin、Y. Rostovtsev、E. S. Fry 和 M. O. Scully，“相干驱动的热原子气体中的超慢群速度与增强非线性光学效应”，《物理评论快报》82，5229（1999）。[6] A. H. Safavi-Naeini、T. P. M. Alegre、J. Chan、M. Eichenfield、M. Winger、Q. Lin、J. T. Hill、D. E. Chang 和 O. Painter，“利用光力学实现电磁感应透明与慢光”，《自然》472，69（2011）。[7] K.-I. Chu、X.-C. Lu、K.-H. Chiang、Y.-H. Lin、C.-D. Chen、I. A. Yu、W.-T. Liao 和 Y.-F. Chen，“通过使用* 型超导人工原子实现电磁感应透明的慢光与光存储”，Physical Review Research 7，L012015（2025）。

tromagnetically induced transparency using a Λ-type supercon- ducting artificial atom," Physical Review Research 7, L012015 (2025). [8] A. V. Turukhin、V. S. Sudarshanam、M. S. Shahriar、J. A. Musser、B. S. Ham 和 P. R. Hemmer，"固体中超慢光脉冲与存储光脉冲的观测"，《物理评论快报》88，023602（2001）。[9] N. Liu、L. Langguth、T. Weiss、J. K¨astel、M. Fleischhauer、T. Pfau 和 H. Giessen，"德鲁德阻尼极限下电磁感应透明的等离激元类比"，Nature Materials 8，758（2009）。[10] M. D. Lukin、M. Fleischhauer、R. Cote、L. M. Duan、D. Jaksch、J. I. Cirac 和 P. Zoller，"介观原子系综中的偶极阻塞与量子信息处理"，《物理评论快报》87，037901（2001）。[11] A. V. Gorshkov、J. Otterbach、M. Fleischhauer、T. Pohl 和 M. D. Lukin，"通过里德堡阻塞实现光子-光子相互作用"，《物理评论快报》107，133602（2011）。[12] N. R. de Melo、C. G. Wade、N. ˇSibali´c、J. M. Kondo、C. S. Adams 和 K. J. Weatherill，"强驱动里德堡系综中的本征光学双稳态"，《物理评论A辑》93，063863 2016( )。[13] Q. Fontaine、T. Bienaim´e、S. Pigeon、E. Giacobino、A. Bramati 和 Q. Glorieux，"光流体中的玻戈留波夫色散观测"，《物理评论快报》121，183604（2018）。[14] Z. Zhang、Y. Zhang、J. Sheng、L. Yang、M.-A. Miri、D. N. Christodoulides、B. He、Y. Zhang 和 M. Xiao，"光诱导原子晶格中宇称-时间对称性的观测"，《物理评论快报》117，123601（2016）。[15] B. Liu、L.-H. Zhang、Y. Ma、Q.-F. Wang、T.-Y. Han、J. Zhang、Z.-Y. Zhang、S.-Y. Shao、Q. Li、H.-C. Chen、G.-C. Guo、D.-S. Ding 和 B.-S. Shi，"驱动耗散里德堡原子气体中时间晶体的分岔"，Nature Communications 16，1419 2025( )。[16] C. Chen、G. Bornet、M. Bintz、G. Emperauger、L. Leclerc、V. S. Liu、P. Scholl、D. Barredo、J. Hauschild、S. Chatterjee、M. Schuler、A. M. L¨auchli、M. P. Zaletel、T. Lahaye、N. Y. Yao 和 A. Browaeys，"二维里德堡阵列中的连续对称性破缺"，《自然》616，691（2023）。[17] H. Bernien、S. Schwartz、A. Keesling、H. Levine、A. Omran、H. Pichler、S. Choi、A. S. Zibrov、M. Endres、M. Greiner、V. Vuleti´c 和 M. D. Lukin，"在51原子量子模拟器上探测多体动力学"，《自然》551，579（2017）。[18] S. Ebadi、T. T. Wang、H. Levine、A. Keesling、G. Semeghini、A. Omran、D. Bluvstein、R. Samajdar、H. Pichler、W. W. Ho、S. Choi、S. Sachdev、M. Greiner、V. Vuleti´c 和 M. D. Lukin，"256原子可编程量子模拟器中的物质量子相"，《自然》595，227（2021）。[19] P. Scholl、M. Schuler、H. J. Williams、A. A. Eberharter、D. Barredo、K.-N. Schymik、V. Lienhard、L.-P. Henry、T. C. Lang、T. Lahaye、A. M. L¨auchli 和 A. Browaeys，"利用数百个里德伯原子模拟二维反铁磁体"，《自然》595，233（2021）。[20] I. Bloch、J. Dalibard 和 W. Zwerger，"超冷气体中的多体物理"，《现代物理评论》80，885（2008）。[21] Z. Zhang、Z. Zhang、S. Han、Y. Zhang、G. Zhang、J. Wu、V. B. Sovkov、W. Liu、Y. Li、L. Zhang、L. Xiao、S. Jia、W. Li，以及

J. Ma，"驱动且相互作用的里德伯气体中的微波耦合光学双稳态"，npj Quantum Information 11, 44 (2025)。[22] J. A. Sedlacek, A. Schwettmann, H. K¨ubler, R. L¨ow, T. Pfau, and J. P. Shaffer，"利用明亮原子共振，在蒸汽池中通过里德伯原子进行微波电测量"，Nature Physics 8, 819 (2012)。[23] Q. Wang, Y. Liang, Z. Wang, S. Guan, P. Yang, P. Zhang, G. Li, and T. Zhang，"通过多体里德伯原子系统中的腔增强临界行为实现微波电场的高精度测量"，Science Chi na Physics, Mechanics & Astronomy 68, 264211 (2025)。[24] F. A. An, E. J. Meier, and B. Gadway，"原子通量晶格中手性电流与磁反射的直接观测"，Science Advances 3, e1602685 (2017)。[25] T. Chen, C. Huang, I. Velkovsky, K. R. A. Hazzard, J. P. Covey, and B. Gadway，"具有磁通量的合成维度中的强相互作用里德伯原子"，Nature Communica-tions 15, 2675 (2024)。[26] D. Yu, W. Song, L. Wang, R. Srikanth, S. K. Sridhar, T. Chen, C. Huang, G. Li, X. Qiao, X. Wu, Z. Dong, Y. He, M. Xiao, X. Chen, A. Dutt, B. Gadway, and L. Yuan，"合成维度发展综述"，Photon-ics Insights 4, R06 (2025)。[27] M.-X. Huo, W. Nie, D. A. W. Hutchinson, and L. C. Kwek，"中性原子中的螺线管型合成场与非阿贝尔阿哈罗诺夫–玻姆效应"，Scientific Reports 4, 5992 (2014)。[28] T. Chen, C. Huang, I. Velkovsky, T. Ozawa, H. Price, J. P. Covey, and B. Gad way，"平带里德伯晶格中阿哈罗诺夫–玻姆囚禁的相互作用驱动的破缺"，Nature Physics 21, 221 (2025)。[29] W. Gou, T. Chen, D. Xie, T. Xiao, T.-S. Deng, B. Gadway, W. Yi, and B. Yan，"超冷原子中耗散阿哈罗诺夫–玻姆环的可调非互易量子输运"，《物理评论快报》124, 070402 (2020)。[30] F. Gerbier and J. Dalibard，"光学超晶格中超冷原子的规范场"，New Journal of Physics 12, 033007 (2010)。[31] X. Wu, F. Yang, S. Yang, K. Mølmer, T. Pohl, M. K. Tey, and L. You，"通过对里德伯原子阵列进行多色缀饰来操控合成规范通量"，Physical Review Research 4, L032046 (2022)。[32] Y. Cheng and H. Zhai，"里德伯原子阵列中涌现的 U(1)晶格规范理论"，Nature Reviews Physics 6, 566 (2024)。[33] C. Carr，"稀薄里德伯系综中的非平衡相变"，《物理评论快报》111 (2013), 10.1103/Phys-RevLett.111.113901。[34] D. W. Preston，"无多普勒饱和吸收：激光光谱学"，American Journal of Physics 64, 1432 (1996)。[35] R. W. P. Drever, J. L. Hall, F. V. Kowalski, J. Hough, G. M. Ford, A. J. Munley, and H. Ward，"使用光学谐振腔进行激光相位与频率稳定"，Applied Physics B 31, 97 1983( )。[36] N. Goldman, J. C. Budich, and P. Zoller，"光学晶格中超冷气体的拓扑量子物质"，Nature Physics 12, 639 (2016)。