

基于一维谐振腔中双光子传输特性的理论研究

徐士涛,张丽琴

(淮北师范大学 物理与电子工程学院,安徽 淮北 235000)

摘要:量子光对一维谐振腔和双光子态在量子信息通信领域的应用具有重要价值。基于耦合腔波导的计算形式,一维谐振腔成功解决了光子的非局域性问题,并显著提高了光子的局域能力,为光与物质的精确相互作用提供了理想平台。通过分析腔体品质因数对双光子态动力学行为的影响,提出了调节品质因数实现对双光子态有效操控的方法,验证了双光子态在量子计算、通信和密钥分发中的高效应用。但量子光学和信息通信领域仍面临提高量子系统相干时间、实现大规模量子系统集成和互操作性,以及开发新型量子材料和器件等挑战,需要继续通过优化一维谐振腔设计和调节腔体品质因数,提升双光子态的稳定性和相干时间,为量子信息技术的实际应用提供新的解决方案。

关键词:一维谐振腔;双光子态;耦合腔波导;腔体品质因数

中图分类号:O431.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-055X(2026)01-0085-09

在信息通信领域,随着通信器件集成度和传输速率的不断提升,对信息传输和处理的要求变得越来越严格^[1-2]。集成电路(IC)的发明是通信器件集成度发展的重要里程碑。IC将多个晶体管和其他元件集成到一块硅片上,大幅降低了体积,减少了能耗,提高了可靠性。而大规模集成电路(LSI)和超大规模集成电路(VLSI)技术进一步提升了通信器件的集成度,其通过将数千到数百万个元件集成到一块芯片上,通信设备的性能显著提升,体积进一步缩小,功耗降低。超大规模集成电路(VLSI)和系统级芯片(SOC)技术的出现标志着通信器件集成度的进一步提升。SOC将处理器、内存、接口和其他功能模块集成到一块芯片上,使得通信设备更加紧凑和高效。这一阶段的技术进步支持了智能手机、平板电脑

收稿日期:2025-07-02

基金项目:安徽省高等学校省级质量工程项目“物理学(师范)专业改造提升项目”(2022zygzts100);淮北师范大学课题“物理学专业固体物理学教学改革浅析”(2022xjxyj040);南京伟泽科教仪器有限公司横向课题“高性能服务器的维护与改进技术的研究”(22100281)。

作者简介:徐士涛,男,山东德州人,工学博士,讲师,主要从事材料物理与化学研究;张丽琴,女,山东淄博人,理学博士,副教授,主要从事原子与分子有关理论计算研究。

和物联网设备的普及。三维集成电路(3DIC)通过垂直集成多个芯片层,进一步提升了集成度和性能。异质集成则将不同材料和技术器件集成在一起,满足了多样化应用的需求。这一阶段的技术发展推动了5G通信、人工智能和边缘计算的快速发展。通信器件的集成度随着技术的进步不断提升,从初期的分立元件到现在的3D IC和异质集成,每一个阶段都带来了通信设备性能、体积和能耗的显著改善。未来,随着新材料、新工艺和新架构的不断创新,通信器件的集成度将继续提高,为信息通信领域带来更多的可能性和机遇。然而,基于传统半导体材料的集成通信器件已经接近其性能极限,这对信息传输的效率和系统化处理能力构成了明显的风险,进而对当前通信技术的发展形成了显著的障碍^[3-5]。

1 研究现状

光子概念最早由爱因斯坦在1905年提出,用于解释光电效应现象。这一理论认为,光不仅具有波动性,还具有粒子性,而且每个光量子(即光子)都具有能量。随着量子力学的发展,光子的研究逐步深入。光子以其快速传播速度、高稳定性和良好的抗干扰能力成为光量子通信的理想载体。在量子通信中,光子是主要的信息载体。光子的量子态(如偏振态、相位态)可以用于编码和传输量子信息。光子具有极低的相互作用能力,使其在长距离传输中保持量子态的稳定性,这是光子在量子通信中的重要优势。光子纠缠态是量子通信的重要资源。在量子密钥分发和量子隐形传态等应用中,纠缠光子对能够确保通信的安全性和传输的无缝性。纠缠态的生成和操控是当前量子通信研究的核心领域。随着光子学和纳米技术的发展,各类高效的光子器件(如单光子探测器、光子源和光子开关)不断涌现,提升了量子通信系统的性能和可靠性。这些器件的进步推动了量子通信技术的实用化进程。光子的发展为量子通信提供了坚实的物理基础和技术支撑。光子作为量子信息的载体,在量子通信中扮演着关键角色。随着量子力学和光子学研究的深入,量子通信技术不断取得突破,从理论探索走向实际应用,展现出广阔的前景。未来,量子通信有望在信息安全、远程通信和量子计算等领域发挥重要作用。

然而,量子态的脆弱性是量子信息技术面临的主要挑战,特别是量子纠缠态和叠加态易受环境噪声的影响^[5]。其脆弱性体现在量子系统与外界环境的不可避免的相互作用,这种相互作用会导致量子态的退相干和信息丢失。量子纠错码和环境隔离技术是目前常用的解决方案,但仍然面临实现难度和成本问题。Yariv^[6]提出的在光子晶体中引入微腔缺陷的方案,为实现高效的光子局域化提供了理论基础,具有重要的实际意义。光子晶体中引入缺陷,这些缺陷可以改变光子晶体的光学性质,使光在缺陷处产生特殊的光学行为,形成光子微腔。Yariv提出的方案不仅是理论上的创新,还激发了大量实验研究,验证了通过微腔缺陷的引入,可以有效地局域化光子,提高光与物质的相互作用效率。Yurii A等人的实验验证包括通过光子晶体的透射和反射光谱测量来确定其光学特性,同时,散射方法和矩阵方法提供了精确的理论模型,用于预测和解释实验结果。随后,实验验证是关键

步骤,通过散射和矩阵方法进行理论描述,使得耦合腔光子晶体的研究更加系统和深入^[7]。进一步的研究表明,一维耦合腔光子晶体不仅具有高效的光子局域化能力,还能够通过设计特定的结构实现宽带或窄带的光学滤波功能。这在光通信中具有重要的应用价值,如实现高速数据传输和多路复用。一维谐振腔确实具有高Q因子、小尺寸和易于集成的优点,适用于多种应用场景。随着材料科学和纳米技术的发展,一维谐振腔的性能和应用领域将不断拓展,为未来科技的发展提供更多可能性。一维谐振腔常用于半导体激光器和光纤激光器中,通过选择合适的谐振频率来产生单模或多模激光输出。通过设计特定结构的一维谐振腔,可以实现高选择性的光学滤波,用于光通信中的波长选择和信号处理。一维谐振腔在量子计算和量子信息处理中起着重要作用,例如在量子点和超导量子比特系统中,用来控制和测量量子态。耦合腔光子晶体结合了光子晶体和谐振腔的优势,通过引入微腔缺陷,能够实现高效的光子局域化和光与物质的相互作用。特别是,一维谐振腔在光学、通信和量子信息等领域具有重要应用,其高品质因子、小尺寸和易于集成的特点使其在未来科技的发展中展现出广阔的前景。随着材料科学和纳米技术的发展,耦合腔光子晶体的性能和应用领域将不断拓展,为信息技术和量子科学的发展提供更多可能性。因此,一维谐振腔作为量子光学基础模型,不仅为研究光与物质的相互作用提供了理想平台,而且在光子的有效控制和操纵方面发挥着关键作用,对量子信息科学的发展具有重要意义。

近年来,双光子态因其在量子信息科学中的应用而受到广泛关注,特别是在量子计算、量子通信和量子密钥分发等领域。双光子态的输运性质,即光子在腔体中的传播和相互作用,是理解和实现这些量子技术的关键。尽管光子态的输运性质已被广泛研究,但双光子态的理论研究相对较少^[8-9]。一维谐振腔不仅能够在特定频率上增强光场,还能够提供一个高度控制的环境,用于实现精确的光与物质相互作用。这在量子信息处理中尤为重要,因为它允许对单个量子态进行精确的操控,从而实现复杂的量子算法和量子通信^[10]。此外,谐振腔还可以用于实现强耦合的量子系统,从而实现量子网络中量子态传输和量子纠缠分发。

尽管量子光学和量子信息通信取得了显著进展,但仍面临诸多挑战:首先,提高量子系统的相干时间以克服量子态的脆弱性是一个主要挑战。相干时间指量子态在不受外界干扰的情况下保持相位一致性的时间长度,是量子计算和通信操作的关键。由于量子系统极其敏感,外部噪声和热效应常常导致相干时间大幅缩短。研究人员正在开发先进的量子纠错码、环境隔离技术和优化的量子材料来解决这一问题,但在实际应用中实现长相干时间仍然是一个重大挑战。其次,实现大规模量子信息处理和通信系统的集成与互操作性。大规模量子系统需要多个量子器件之间的精确协调和高效通信,对系统的稳定性和性能提出了极高的要求。目前,量子计算机的规模受到硬件限制,量子比特的数量和连接方式限制了系统的扩展性。此外,不同类型量子比特之间的互操作性问题也是一个亟

待解决的难题,如超导量子比特、光子量子比特和离子阱量子比特。研究人员正在探索通过量子中继、量子网络和混合量子系统来实现这些目标,以构建更大规模、更复杂的量子信息处理和通信系统。

开发新型量子材料和器件以提高系统性能和可扩展性也是未来研究的重要方向。新材料的开发可以显著提升量子比特的性能。例如,通过提高超导材料的纯度和降低其噪声水平,可以延长超导量子比特的相干时间。在光子学领域,开发低损耗、高效率的光子器件,如单光子源、光子探测器和光子开关等,是实现高效量子通信的关键。研究人员还在探索拓扑绝缘体、量子点和二维材料等新型材料,以期在量子计算和量子通信中获得突破性进展。这些新材料和器件的开发不仅能提升现有量子系统的性能,还能为量子信息技术的进一步发展提供新的可能性。

2 一维谐振腔理论推导与结果分析

量子光学与信息通信是一个充满挑战和机遇的领域,不仅提供了探索量子世界的新工具,还为信息技术的革命性发展奠定了基础。通过持续的研究和创新,有望实现更加安全、高效和强大的量子信息技术。这些技术将不仅应用于计算和通信,还将在医疗、金融、安全和科学研究等领域产生深远影响。展望未来,国际合作和跨学科研究将成为推动量子技术发展的关键。全球各地的科学家和工程师将共同努力,攻克技术难关,推动量子信息技术从实验室走向实际应用,为人类社会带来新的进步和发展。

2.1 一维谐振腔的理论模型

一维谐振腔的哈密顿量可以用量子谐振子的形式表示为式(1):

$$H = \hbar\omega \left(a^+ a + \frac{1}{2} \right) \quad (1)$$

式中: \hbar 表示约化普朗克常量; ω_c 表示谐振腔的共振频率; a^+ 和 a 分别表示光子的创造和湮灭算符且满足玻色子的对易关系, $[a^+, a] = 0$, 创造算符是处于特定状态的多个粒子,其粒子数增加1的算符,湮灭算符是处于特定状态的多个粒子,其粒子数下降1的算符。创造算符和湮灭算符互为对易关系。

2.2 一维谐振腔中的双光子态动力学

双光子态是由两个光子的创造算符依次作用在真空态上构成的,具体见式(2):

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(a^+)^2|0\rangle \quad (2)$$

考虑到双光子态在一维谐振腔中的动力学,采用薛定谔方程来描述双光子态随时间的演化,则有式(3):

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle = H |\psi(t)\rangle \quad (3)$$

因此,双光子态在谐振腔中的时间演化可以表示为式(4):

$$|\psi(t)\rangle = e^{-i2\omega t}|\psi\rangle \quad (4)$$

考虑到光子之间的相互作用,特别是Kerr非线性效应,系统的哈密顿量可以修改为式(5):

$$H' = \hbar\omega_c a^+ a + \frac{h_\chi}{2}(a^+)^2 a^2 \quad (5)$$

式中: h_χ 是描述光子之间非线性相互作用强度的参数。双光子态的时间演化通过薛定谔方程来描述,可以表示为式(6):

$$|\psi(t)\rangle = e^{-i(\omega+\chi)t}|\psi\rangle \quad (6)$$

这表明在考虑相互作用的谐振腔中,双光子态以角频率 $\omega+\chi$ 振荡,其中 χ 表示光子相互作用对振荡频率的贡献。通过上述公式的推导,构建了考虑光子相互作用的一维谐振腔和双光子态的理论模型,并得到了双光子态在该模型中的动力学行为。

根据公式(6),利用基于有限元法(FEM)和量子主方程(Quantum Master Equation)的数值模拟,谐振腔光场分布的模拟如图1所示。

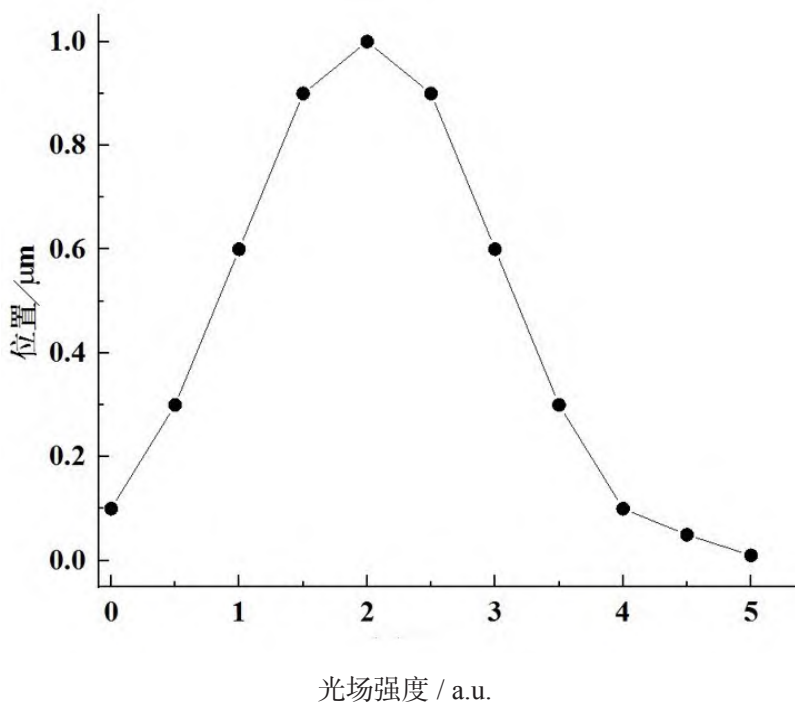


图1 谐振腔光场分布模拟

模拟中采用的谐振腔的长度和宽度均为 $1\mu\text{m}$,假设反射率是99%,图1显示了谐振腔内光场强度的变化。可以看出,光场强度在谐振腔中心处达到最大,并随着距离的增加逐渐减弱。

双光子态中,若进一步考虑到光子态会随着时间发生变化,得到双光子态的时间相关变化规律,如图2所示。

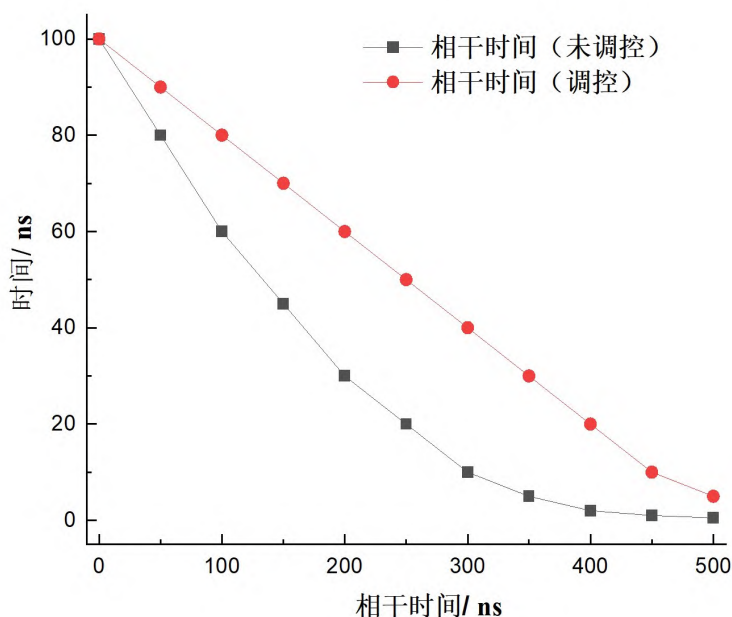


图2 双光子态相干时间相关变化规律

图2清晰地表明,通过调控谐振腔的品质因数,可以显著延长双光子态的相干时间,从而提高量子信息处理的稳定性。这种模型对于研究非线性光学效应和量子信息处理中的光子相互作用具有重要意义。腔体的共振频率 ω 和腔体的品质因数(Q因子)是在一维谐振腔中决定双光子态的重要因素:共振频率 ω 决定双光子态振荡频率的重要参数,随着共振频率 ω 的变化,双光子态的振荡频率也会发生相应变化,从而影响光子在腔体内的传播和局域特性;而腔体的共振频率与腔体的几何尺寸和材料特性有关,通过改变这些参数可以实现对应 ω 的调控。

2.3 一维谐振腔中的品质因数(Q因子)

腔体的品质因数(Q因子)反映了腔体对光子的捕获和存储能力。高Q因子意味着腔体内的光子损耗较小,光子可以在腔内存储更长的时间,从而增强光子之间的相互作用和纠缠效果。Q因子与腔体的材料特性、几何结构和环境条件有关。通过优化这些参数,可以提高Q因子,进而提高量子信息处理的效率和稳定性。考虑到腔体的损耗,引入耗散项来描述腔体与外部环境的耦合,即式(7):

$$H' = H - i\hbar\kappa a^\dagger a \quad (7)$$

其中,系统哈密顿量 H 描述了腔内光子的能量和相互作用, κ 是与腔体损耗率相关的参数。

对于考虑光子相互作用的一维谐振腔,系统哈密顿量可以写为式(8):

$$H = \hbar\omega a^\dagger a + \frac{\hbar\chi}{2}(a^\dagger)^2 a^2 \quad (8)$$

耗散项可以通过引入耗散算符 L 来表示,对于腔体损耗,耗散算符通常取为 α ,即式(9):

$$H = i\hbar\kappa(a^+L - La) \quad (9)$$

式中: κ 是与腔体损耗率相关的参数。当 Q 因子较高时,即 κ 较小,腔体损耗较小,双光子态可以在腔内保持较长时间,从而增强光子之间的相互作用和纠缠效果。

不同距离下双光子态的运输效率如图3所示。

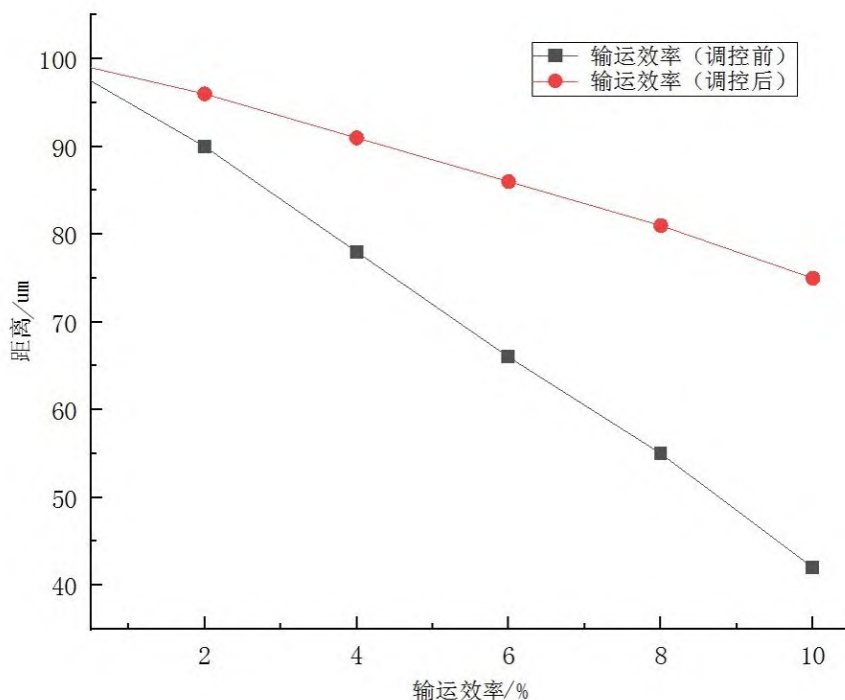


图3 不同距离下双光子态的运输效率

图3展示了不同距离下双光子态的运输效率。调控后,运输效率显著提高,表明调控谐振腔品质因数对提高光子运输效率具有积极作用。当腔体的 Q 因子较低时,意味着腔体内的能量损耗较大,这导致光子在腔内的存储时间显著减短。由于双光子态需要在腔内保持足够长的时间以进行有效的相互作用和纠缠,低 Q 因子将导致这些效果显著减弱。当 Q 因子较高时,即 κ 较小,腔体损耗较小,双光子态可以在腔内保持较长时间,从而增强光子之间的相互作用和纠缠效果。这不仅影响了量子态的存储时间,还降低了光子之间相互作用的强度,使得双光子态的稳定性和纠缠度受到限制。在实际应用中,这会导致量子信息处理和传输效率的下降。

通过这些模拟数据,可以清晰地看到,一维谐振腔在提高光子局域化和双光子态运输效率方面的显著效果。同时,调控谐振腔的品质因数对双光子态的相干时间和运输效率具有积极影响,验证了理论模型的有效性。这些模拟结果为进一步的实验研究提供了重要的参考依据。通过调节腔体的品质因数,可以精确控制双光子态在腔内的行为。当提高 Q 因子时,腔体内的能量损耗减少,光子存储时间延长,使得双光子态的相互作用和纠

缠效应增强。这种调控对于量子信息处理和量子通信至关重要。例如,在量子计算中,高Q因子的腔体可以延长量子比特的相干时间,提高量子计算操作的准确性和效率。在量子通信中,调节Q因子可以优化量子密钥分发协议的性能,确保量子信号的传输可靠性和安全性。

综上所述,在一维谐振腔中,双光子态的行为受到多个参数的共同影响,其中包括光子相互作用强度、腔体的品质因数以及共振频率——光子相互作用强度决定了双光子态的耦合效率和纠缠度,腔体的品质因数影响光子存储时间和能量损耗,共振频率则决定了腔体的谐振条件。通过精确调控这些参数,可以实现对双光子态的有效操控。例如,调节腔体的共振频率,使其匹配双光子态的能量,可以提高相互作用的效率。调整Q因子可以优化光子态的存储和传输,增强量子系统的性能。这些调控技术为量子通信和量子计算提供了重要的技术手段,使得在实际应用中能够实现高效、稳定的量子信息处理和传输。

3 研究结论与讨论

从量子光学的角度分析了一维谐振腔和双光子态在量子信息通信领域的重要作用。一维谐振腔通过耦合腔波导的形式解决了光子的非局域性问题,并在光子带隙范围内实现了更高的局域光能力,为光与物质的精确相互作用提供了理想平台。双光子态在量子计算、量子通信和量子密钥分发等领域具有广泛应用,其输运性质是实现这些量子技术的关键。一维谐振腔不仅能够在特定频率上增强光场,还能够提供一个高度控制的环境,用于实现精确的光与物质相互作用,从而实现复杂的量子算法和量子通信。

此外,腔体品质因数对双光子态的动力学行为有显著影响,通过调节品质因数可以实现对双光子态的有效操控。尽管量子光学和量子信息通信领域取得了显著进展,但仍面临着许多挑战,如提高量子系统的相干时间,实现大规模量子信息处理和通信系统的集成与互操作性,以及开发新的量子材料和器件。

因此,研究结果为量子器件的结构优化与性能提升提供了坚实的理论支撑。同时,文中提出的品质因数调控方法为后续的实验探索与实现奠定了可行的技术路径。结合新型量子材料与先进微纳加工工艺,有望进一步改善腔体特性并拓展其应用潜力,不仅将促进量子通信与量子计算的发展,还将为构建高效稳定的量子网络提供新的思路。

4 参考文献

- [1] Chun Chaqu, Zhou Lei, Sheng Yongbo. Cascaded multi-level linear-optical quantum router[J]. International Journal of Theoretical Physics, 2015, 54:3004-3017.
- [2] Jeff H K. The Quantum Internet[J]. Nature, 2008, 453: 1023-1030.
- [3] 马锡英. 光子晶体原理及应用[M]. 北京:科学出版社, 2010:64-78.
- [4] 刘泰康,赵亚丽. 光子晶体技术及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2015:30-48.

- [5] Ignacio J C, Zoller P, Jeff H K, et al. Quantum state transfer and entanglement distribution among distant nodes in a quantum network[J]. *Physical Review Letters*, 1997, 78:3221–3224.
- [6] Yariv A, Xu Yong, Lee R K, Scherer A, et al. Coupled-resonator optical waveguide: a proposal analysis[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(11):711–713.
- [7] Yurii A, Stuart V, McNab J. Coupling into the slow light mode in slab-type photonic crystal waveguides[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(1):50–52.
- [8] 张丽琴,徐士涛. 信息熵原理探讨及其在二元系统的应用[J]. *齐鲁工业大学学报*, 2023, 37(6):70–76.
- [9] 张晓金. 二维光子晶体微腔特性分析及应用研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2019:23–30.
- [10] 张若羽,李培丽. 基于一维耦合腔光子晶体的声光可调谐平顶滤波器的研究[J], *物理学报*, 2021, 70(5):175–183.

Theoretical Study of Diphoton Transport Properties Based on One-dimensional Resonant Cavities

Xu Shitao, Zhang Liqin

(School of Physics and Electronic Engineering, Huaibei Normal University, Huaibei 235000, China)

Abstract: Quantum light holds significant value for the application of one-dimensional resonant cavities and diphoton states in the field of quantum information and communication. By utilizing coupled cavity waveguides, the one-dimensional resonant cavity effectively addresses the photon non-locality issue and significantly enhances photon localization, providing an ideal platform for precise light-matter interactions. The study thoroughly investigates the impact of the cavity quality factor on the dynamics of biphoton states and proposes methods to effectively control these states by adjusting the quality factor. Experimental results demonstrate the efficient application of biphoton states in quantum computing, communication, and key distribution. However, the field of quantum optics and information communication still faces challenges such as increasing the coherence time of quantum systems, achieving large-scale quantum system integration and interoperability, and developing new quantum materials and devices. Continued efforts are needed to improve the stability and coherence time of biphoton states by optimizing the design of one-dimensional resonant cavities and adjusting the cavity quality factor, offering new solutions for the practical application of quantum information technology.

Keywords: One-dimensional resonant cavity; Diphoton states; Coupled cavity waveguides; Cavity quality factor

[责任编辑:江 伟 张俊英]