



2014年版

中国工程物理研究院 科技年报

Annual Report of China Academy of Engineering Physics



• 中国原子能出版社 •

2014 年版

中国工程物理研究院

科技年报

**Annual Report of
China Academy of Engineering Physics**

编辑部通讯地址

四川省绵阳市 919 信箱 805 分箱

邮编: 621999

电话: (0816) 2485754, 2485793

传真: (0816) 2485753

E-mail: HPLPB @caep.ac.cn

URL: www.caep.cetin.net.cn

中国原子能出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

中国工程物理研究院科技年报 : 2014 年版 / 《中国工程物理研究院科技年报》编辑部编. — 北京:中国原子能出版社, 2014.11

ISBN 978-7-5022-6441-3

I. 中… II. 中… III. ①工程物理学—中国—2014—年报 IV. ①TB13-54

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 260111 号

本书主要介绍 2013 年度中国工程物理研究院在物理、力学与数学、化学与材料科学和信息科学与电子工程等重点学科与研究领域的部分科研进展与科研成果, 这些内容采用专稿形式, 充分体现了科研特色, 展示了科研能力。另外, 本书还介绍了 2013 年度中国工程物理研究院科研人员申请的国家自然科学基金资助项目、科研人员在全国性学会中部分任职情况、中国工程物理研究院组织或参加的国内外学术交流活动以及当年度硕博学位论文题目。

本书旨在加强与国内外同行之间的交流与合作, 并可供从事科学研究与管理的有关部门和科技人员、高等院校师生参考。



中国工程物理研究院科技年报/2014 年版

出版发行 中国原子能出版社 (地址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮编: 100048)

责任编辑 付 真

特约编辑 唐 勇 肖 燕

印 刷 四川绵阳科学城曙光印刷厂

经 销 全国新华书店

开 本 880 mm×1230 mm 1/16

字 数 414 千字

印 张 14.5

版 次 2014 年 11 月第 1 版 2014 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-6441-3

印 数 1—1 000 定 价 100.00 元

版权所有 侵权必究 出版社网址: <http://www.aep.com.cn>

《中国工程物理研究院科技年报》

编审委员会

主 任 彭先觉

副主任 汪小琳 赵武文

委 员 (以姓氏笔画为序)

王 韬	帅茂兵	叶春福	田 忠	李正宏	李敬明
肖世富	何建国	何铁宁	何朝晖	应阳君	张 凯
张 健	张传飞	张保汉	范国滨	杨礼兵	罗文华
孟凡宝	赵 锋	赵成杰	胡海波	莫 军	席传裕
黄秀光	隋 展	曾 超	魏智勇		

编辑部 唐 勇 肖 燕 刘 剑



院长致辞

1964年10月16日，我国第一颗原子弹爆炸成功。这是科学、技术和工程紧密结合、有机互动的重大成果，也是一个世界级科研团队诞生的正式宣告。五十多年来，中国工程物理研究院人始终秉承“高水平的核武器科技能力是国家战略威慑力量的重要组成部分”的理念，始终弘扬“爱国奉献、艰苦奋斗、协同攻关、求实创新、永攀高峰”的“两弹精神”，始终坚持“知其然，知其所以然”的科研精神，自力更生，自主创新，闯出了一条具有中国特色的核武器与高新技术装备相辅相成、协同发展的道路，为我国战略核力量建设及相关科技进步做出了不可磨灭的贡献。

2014年版科技年报收录的54篇论文，较好地反映了近年来院高度重视广义战略科技所取得的成绩，是献给我国第一颗原子弹爆炸成功五十周年的一份厚礼。其中，爆轰加载材料和结构动力学行为精密物理机制辨识和建模进步显著，相关成果可用于具有预测能力的程序框架相关模型的改进和完善，对相关问题的思辨为后续研究提供了借鉴；强度因素对金属不稳定性影响的数值模拟研究取得阶段性成果，对提高内爆压缩效率具有重要意义；中子应用技术研究系统构建了高压、低温和高温原位中子衍射技术，率先开展了中子应力分析装置-实验-数值模拟系统研究，率先使用多种谱仪开展前沿探索，获得了系列重要实验数据；金属氟化物研究取得5个方面的重要突破，相关研究成果在核技术领域具有重要应用价值；基于波导量子电动力学的单光子量子器件理论研究取得系列重要研究成果，实质性地推动了该分支领域的发展，对光子量子信息处理具有重要意义；太赫兹高速通信技术实现了国内多个“第一”，填补了我国Gbps量级高速通信技术的空白，对追赶世界先进水平、提升我国信息传输能力具有里程碑式的重大意义；高精度四极质量分析器制造技术达到国际先进水平，相关产品在国产仪器上成功应用，打破了该产品长期受制于国外企业的不利局面；低能质子加速器取得长足进展，PET医用质子回旋加速器已突破所有关键技术，介质壁质子直线加速器各关键器件的主要技术参数达到或接近指标要求，在国家安全、国民经济、科学研究、医疗健康等方面具有广泛应用前景。

新时期、新起点，中国工程物理研究院将继续以“铸国防基石、做民族脊梁”为己任，紧扣需求、协同创新，紧盯瓶颈、深究所以，紧跟前沿、重点探索，全力推进核武器、战略高新技术装备、战略科技全面协调可持续发展，大力提升科学、技术和工程能力，着力抓好科技成果应用及转化等“最后一公里”工作，奋力打造国际一流科研、技能和管理人才队伍，努力建成国家解决战略性安全问题的重要研究院，为维护国家安全、实现民族振兴、推动科技进步、服务经济发展做出新贡献。

中国工程物理研究院院长

赵贞贞

中物院精神

做民族脊梁
铸国防基石





综述

基于波导量子电动力学的单光子量子器件理论研究.....	孙昌璞	1
中子散射研究.....	孙光爱	10
爆轰加载材料和结构动力学行为精密物理机制辨识和建模.....	胡海波	16
国产高精度四极质量分析器制造技术.....	王宝瑞	26
金属氟化物研究.....	彭述明	32
太赫兹高速通信技术研究.....	邓贤进	38
低能质子加速器研究进展.....	杨国君	42

物理与数学

柱面内爆磁通量压缩物理实验技术.....	谷卓伟	51
炸药反应流场诊断技术.....	李金河	53
$\text{SrB}_4\text{O}_7:\text{Sm}^{2+}$ 高温压力标定技术.....	敬秋民	56
一种新型爆炸膨胀环实验装置及其应用.....	汤铁钢	59
压强致富氢化合物 AlH_3 超导转变温度的研究.....	姬广富	63
温稠密等离子体吸收边光谱特性研究.....	赵 阳	65
利用高能电子流触发过密等离子体的激光脉冲整形.....	李晓亚	68
相对论强度激光与等离子体作用产生超强太赫兹辐射源.....	陈自宇	71
微结构靶产生的小焦斑短脉冲 X 射线源.....	董克攻	74
强度因素对金属影响不稳定性的数值模拟.....	刘 军	78

力学与工程

不平整激波冲击产生界面扰动的实验研究.....	刘金宏	83
一种坐标测量机中多部件轴线间偏差的评价方法.....	武太文	88
金属粉末激光熔融成形致密化机理研究.....	杨家林	91
动压箔片轴承关键技术.....	郑越青	95
长寿命高反射率的银反射膜制备技术.....	杨文茂	99
连续位相板的高精度加工和测试技术.....	温圣林	102
二维多重大变形 ICF 内爆靶的 ALE 数值模拟.....	勇 珩	105

材料与化学

过渡金属离子掺杂对六方钨青铜氧化钨吸附 Sr/Cs 性能的影响.....	李兴亮	111
纳米层状结构陶瓷 Ti_3SiC_2 和 Ti_3AlC_2 本征点缺陷行为研究.....	张海斌	114
不同辐照条件下硅橡胶泡沫材料的辐射效应.....	黄 玮	117
分子间 $\text{p}-\pi$ 堆积作用对炸药共晶结构与性能的影响.....	张浩斌	120
核壳型复合炸药的制备与性能.....	杨志剑	123

基于 π - π 作用的界面相容性及其对复合材料绿色合成的促进研究	王 斌	126
有机-无机杂化太阳能电池研究	徐海兵	129
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{FeAl}$ 阻氚涂层关键科学技术问题研究	张桂凯	132
贫铀表面的真空离子氮化改性	胡 殷	135
Mg_2NiH_4 三相结构的第一性原理计算研究	敖冰云	139
碳基纳米功能复合材料研究	唐昶宇	142

电子与信息

太赫兹雷达成像与 RCS 缩比测量技术	成彬彬	149
MEMS 湿法刻蚀表面粗糙度控制技术	唐 彬	154
基于不确定性量化的非精确概率可靠性理论	锁 彬	157
高产额中子发生器	肖坤祥	161
过模波导器件迭代设计方法	王 强	164
复杂电磁环境数值模拟平台	刘 阳	167
基于自适应采样的并行光线投射体绘制算法	王华维	170
智能视频分析及主动预警技术	陈 潇	173
基于 Multi- h CPM 的遥测技术	钟 声	177
毫米波准光模式转换器研制	屈 劲	180

光学与电气工程

基于“聚龙一号”装置的物理实验研究	黄显宾	185
太赫兹光谱成像仪样机研制及其在生物医学中的应用	孟 坤	189
熔石英光学元件亚表面层缺陷及其对损伤性能的影响	刘红婕	192
C 波段加速器装置研制	柏 伟	195
S 波段长脉冲高增益相对论速调管研制	吴 洋	198
基于同步探测的钠导星聚焦非等晕性试验	陈天江	201
基于 mini-bar 二极管激光芯片的高亮度光纤耦合技术	郭林辉	204
高重频大能量 532 nm 绿光激光器	童立新	207
冲击射流复合微通道冷却技术研究	杨 波	210

附录 A 2013 年度中国工程物理研究院部分重点学术会议	217
附录 B 2013 年度国家自然科学基金资助项目	220
附录 C 2013—2014 年度中国工程物理研究院在全国性学会中部分任职情况	223
附录 D 2013 年硕士、博士研究生毕业学位论文题录	229



孙昌璞 院士 010-82687033 E-mail: cpsun@csrc.ac.cn

基于波导量子电动力学的单光子量子器件理论研究

20 世纪量子物理的蓬勃发展导致了激光、半导体以及核能等革命性技术的诞生，促进了人类社会科学技术进步。20 世纪末，人们企图在信息处理方面进一步开发和利用量子效应，应运而生的量子信息就是人们在这方面极有发展潜力的尝试：充分利用单个或少数粒子展现出来的量子相干性（如量子并行、量子纠缠和量子不可克隆等），在原理上可以实现大大超越经典方式的信息存储、转换和逻辑门操作，为突破传统计算机体系构架下集成芯片尺度极限提供了新的思路。这方面的研究要求人们能够在单粒子层面上对量子态进行制备和相干调控，实现能凸显量子相干效应的新一代量子元器件。

然而，实现理想的单粒子量子调控并非易事，环境的影响会导致量子相干性的破坏——量子退相干。例如，电子会与电磁场、甚至处在真空上的电磁场相互作用，发生自发辐射。因此，寻找适当的物理系统、创造和改善其物理环境以持久保持其量子相干性，已经成为量子信息物理实现和未来量子相干器件研究的核心问题。作为电磁场量子化的实体，光子与电磁场环境没有直接的相互作用，因此在自由空间乃至光纤中不易损耗，是一种可飞行的量子信息载体，目前在量子通信和量子密码中有十分广泛的应用。然而，根据量子电动力学，光子与光子间没有直接相互作用，实现光子对光子的量子调控十分困难，从而构建全部基于光子的全局量子网络有原理上的挑战。

光子在芯片上的相干集成是光量子信息处理研究的核心科学技术问题。量子网络由量子信道和量子节点构成（见图 1）。在芯片上，量子信道由波导实现，量子节点是放置了量子比特的两个或更多个波导的交汇点。在量子节点上，量子比特也可以替换为具有特定功能的量子发射器，可用来转换、处理和存储量子信息。在波导构成的量子信道中，光子极化自由度形成飞行量子比特，在波导中传输，将量子信息从一个位置带到另外一个位置，在整个网络中分发纠缠。光子是理想的飞行量子比特，它具有强稳定性、强抗干扰力、高数据传输率和低热耗的若干优点。虽然光子与光子之间无直接的相互作用，但是可以通过物质中介诱导光子间相互作用。当然，在自由空间中，原子与光作用的高阶过程会涉及到不同频率的光子随机产生和湮灭的虚过程，量子器件也因为这样的多光子过程，损害单光子的基本功能。

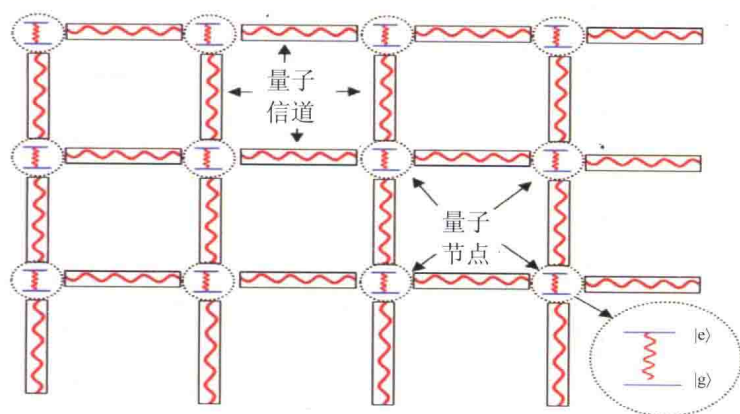


图 1 量子网络由量子信道和量子节点构成

为了应对光子系统相干集成构建全局量子网络的这些科学挑战,人们转向对受限光子系统的研究。把光子受限于特定的空间区域如微腔,微腔会选择光子的特定频率,增强它们与该区域中单原子或多原子的有效相互作用。这就是微腔量子电动力学(腔 QED)研究的内容。然而,在传统的腔 QED 研究中,光子被限制在一个定域模上,虽然可以大大加强光与原子耦合,但不易于空间扩展,无法形成与远程系统的耦合。兼顾了腔 QED 耦合增强的优点,波导量子电动力学(波导 QED)系统(见图 2)可以把光子从特定方向导引到给定的目标。近十年来,我们在量子信息和未来量子器件应用目标驱动下,在波导 QED 方向开展了深入系统的研究并取得了一系列的研究成果,实质性地推动了该分支领域的发展。

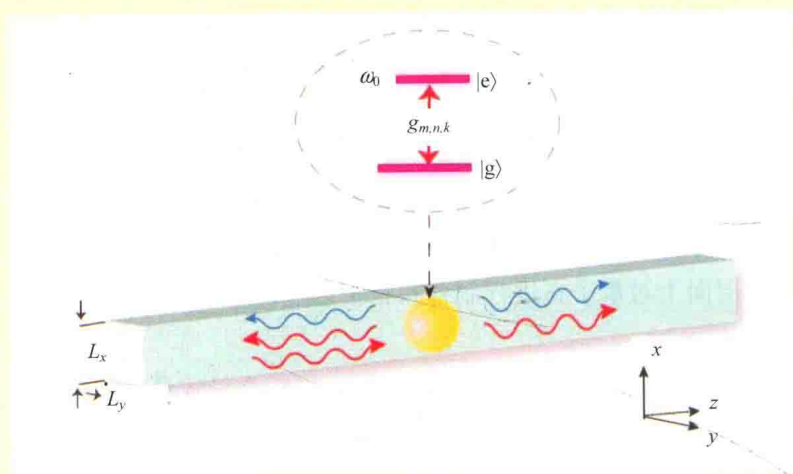


图 2 嵌于矩形波导管横截面中心的二能级“原子”通过偶极跃迁与波导管的电磁模式耦合

在物理上,有两类系统可以实现波导 QED 的功能:一是横向截面很小的矩形或圆形波导管(见图 2);二是由微腔耦合阵列构成的耦合腔波导(详见第三节的图 8(a))。前者,由于存在各种各样的横向模式,其中的介质原子会诱导出相关的横向-纵向模式之间极为复杂的相互作用,对光子操纵有一定的困难。我们最近的研究表明,通过模式间的量子干涉效应,可以构造易于操纵的量子通道。这个发现有助于克服光子通道丢失困难。对于后者,耦合腔波导的研究近十年有很大的进展,我们在这方面开展了系列的研究工作,下面我们将做比较详尽的介绍。

1 波导 QED 处理单光子传输和高能光子量子光学

为了分析波导 QED 控制单光子相干传输的物理机制,我们先讨论理想化的一维波导。假设它的横向截面特征长度与传播模式典型波长相比很小,光子传播时不容易从一个横向模式转移到另一个横向模式上。我们简化的模型只是由一个一维波导和与之耦合的二能级原子组成。在波导管中,传输的单光子在网络节点处被二能级原子散射。光子一部分直接绕过二能级原子,另一部分被二能级原子吸收再辐射出来,这两部分在传输过程中产生 Fano 干涉。当光子频率与原子跃迁共振时,Fano 干涉在透射方向上是完全抵消的,即共振光子透射率为零;大失谐的光子由于没有被原子吸收而完全透射。因而,人们可以通过调节“原子”能级来实现光子在传输方向上的开关效应——共振时像镜子一样把光子反射回去,而大失谐时像真空一样让光子自由透过。

实际的波导管并非总是可以简化成一维波导。一维波导没有截止频率,任意频率的光子都可以在其中传播,光子色散关系是线性的,光子态密度是常数。与此相对,实际的波导管有横截面和多个横向模式,有截止频率和特殊的光子色散关系,光子态密度有奇点和零点。在微波段,光子波长通常比波导管横截面特征长度大得多,不需要考虑横向模式效应,因而,一维波导近似足以抓住关键的物理现象。

随着自由电子激光等高频率相干光源的发展，在可以预见的将来，涉及到高频率光子的量子网络研究将变得十分重要。当光子波长比波导管横截面特征长度更小时，一维波导近似将不再适用，需要发展新的理论方法，短波长光子与“原子”散射过程中会“丢失”到高级通道，即使与“原子”共振也不能被全反射^[1]。这意味着二能级“原子”的开关功能对短波长光子将失效。然而，在系统地研究一个真实的有限横截面波导管中二能级“原子”对单光子传输的影响时，我们发现这个问题可以通过多通道干涉来解决^[2]。

如图 3 所示，波导管有不同的横向模式，每个横向模式定义光子的一个传播通道。把短波长光子制备在可能的通道的叠加态上，根据多通道干涉的效果，叠加态空间可以划分为一个可控制通道(各个横模的叠加系数正比于耦合常数)和与之互补的自由子空间。当光子波长远小于波导管横截面特征长度时，只要将光子精确制备到可控制通道，则二能级“原子”仍然能很好地实现光子开关功能。任意单光子量子态都可以投影到可控制通道和自由子空间。当波导管横截面变大(或光子波长变短)，自由子空间的维数会增加，而可控制通道永远是唯一的。这个趋势揭示出高维散射过度到低维散射后呈现出更丰富的量子干涉效应的深层原因。图 3 中 Ω_1 ， Ω_2 ， Ω_3 分别为各个模式的截止频率。

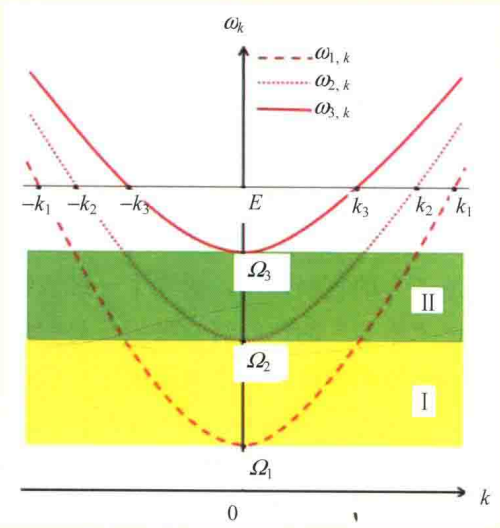


图 3 矩形波导管中各个电磁模式的色散关系

图 4 刻画了这种横向转换导致的光子“丢失”效应。图 4(a)描述了光子从最低横模(截止频率为 Ω_1)入射的情况，其能量 E 在 Ω_1 和第二个横模(截止频率为 Ω_2)之间，这时，原子对光子的散射控制是理想的。

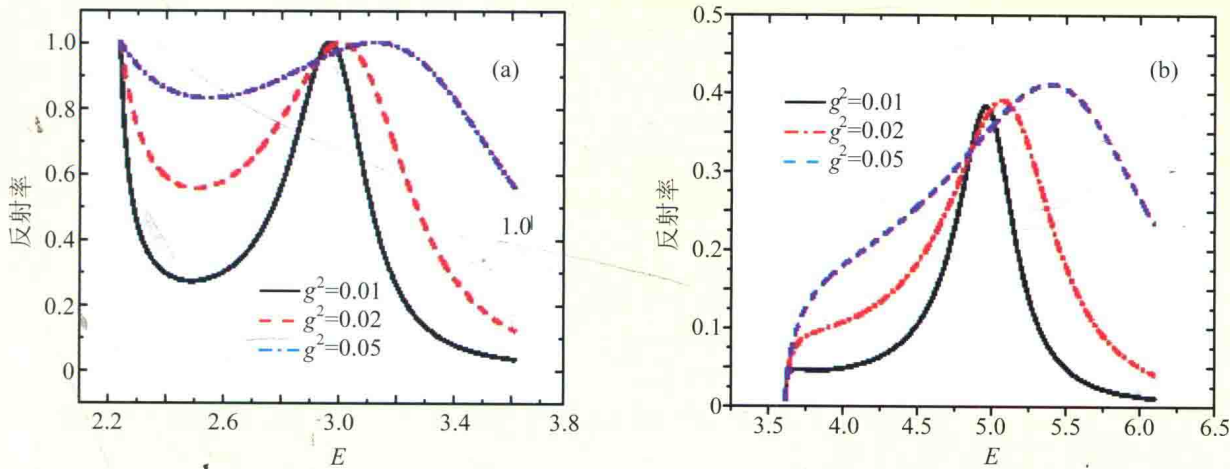


图 4 (a)低能光子入射情况和(b)较高能光子入射情况时的多通道单光子反射谱



在共振处的反射率可以达到 100%。但是，对较高能量的光子， $E \geq \Omega_2$ ，散射光可以从第一个通道跃迁到第二通道，因而理想的全反射不再出现。如图 4(b)所示，反射率仅能达到约 40%。图 5 表明，对于能量较高的仅仅从第一个横模入射的光子，原子仅仅能控制光子全反射到 40%(虚线)，但对于不同横模叠加形成的可控制通道，则可以 100%地控制(实线)。

能量较高的光子除了会导致导引光的横模效应，还会导致与原子反冲相联系的一系列新的物理效应。随着 X 射线自由电子激光实验的快速进展，高能光子量子光学研究日见重要。短波长(高频率)光子被二能级“原子”散射时还可能引起动量反冲，即光子与“原子”之间产生动量转移。我们用谐振子模拟

“原子”的空间运动，研究了一维散射中“原子”的动量反冲对单光子透射谱的影响^[3]。如图 6 所示，“原子”的二能级被谐振子势劈裂成为两个距离为 Ω 的边带。由于动量反冲效应，“原子”空间自由度的能级跃迁造成了光子吸收谱的多峰劈裂，间隔与一个声子的能量大约相等，如图 7 所示，图中 $\epsilon_{LD} = \Omega / (v_g (2M\omega)^{-2})$ 是 Lamb-Dicke 参数，表征原子反冲效应的强度。其中 M 和 ω 分别为谐振子的质量和频率， Ω 为原子跃迁频率， v_g 为光子群速度。 ϵ_{LD} 越大，反冲效应越显著。随着 ϵ_{LD} 增加，越来越多的声子峰出现在单光子吸收谱中。这说明单光子吸收谱能够把“原子”空间自由度的能级“扫描”出来，根据单光子吸收谱可以反向推测空间运动“原子”的能级结构。

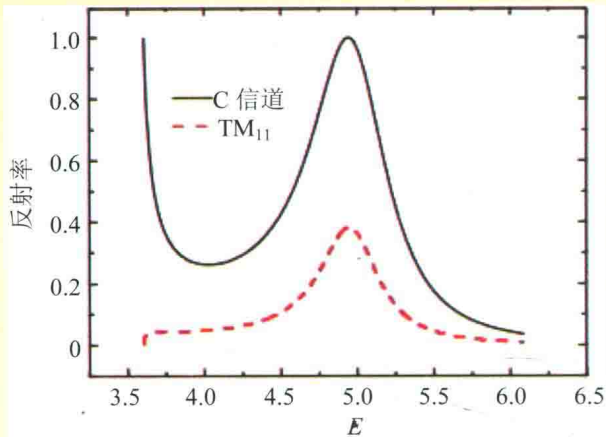


图 5 单通道损失和可控相干通道的反射谱



图 6 (a) 一维波导中波矢为 k 的光子被一维谐振子势阱中的二能级“原子”散射。“原子”跃迁频率为 Ω ，谐振子频率为 ω ，光子频率为 ω_k ；(b) “原子”的能级结构由原来的两个能级劈裂成为距离为 Ω 的两个边带。

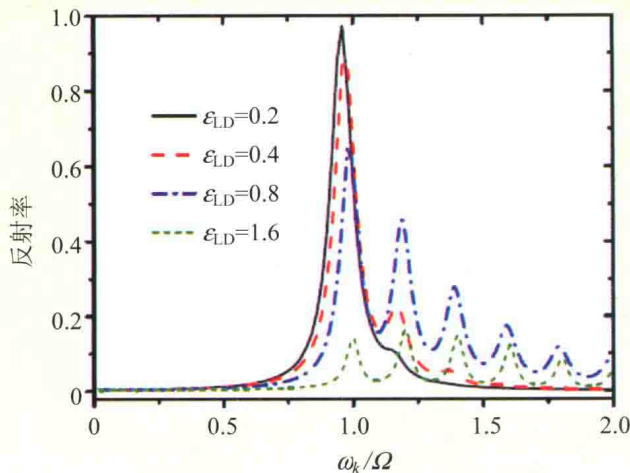


图 7 单光子吸收谱的多峰劈裂

2 一维耦合腔波导中单光子输运与单光子开关

耦合腔构成的一维波导是一种具有非线性色散的人工波导，它可以由光子晶体缺陷腔阵列加以实现。如图 8(a)，耦合腔波导是由邻近单模腔通过延伸到腔外的腔模函数相互耦合而成的一种离散结构的波导。耦合腔波导有如下特点：(1)光与物质强相互作用；(2)带状频谱结构；(3)可大规模集成(实验上现已能耦合 100 个以上高品质纳米腔)；(4)具有可寻址性，易于单个操作；(5)能谱呈非线性，与杂质耦合可以形成光子的束缚态。如图 8(a)中的一维耦合腔，仅考虑腔的基频模式，若其中每个腔的本征频率相同（设为 ω ），并且腔与腔之间的耦合强度相同的话(设为 ξ)，则此耦合腔波导的频率与波矢之间的关系为： $\omega_k = \omega - 2\xi \cos k$ ， $k \in [-\pi, \pi]$ ，如图 9(a)所示，此色散关系是非线性的。将波矢在 $k_0=0$ 附近展开可得到二次型的色散关系，而在 $k_0=\pm\pi/2$ 处展开可得到一次型的色散关系。因此，此耦合腔波导可模拟高能区域的线性波导和低能区域的二次型波导。

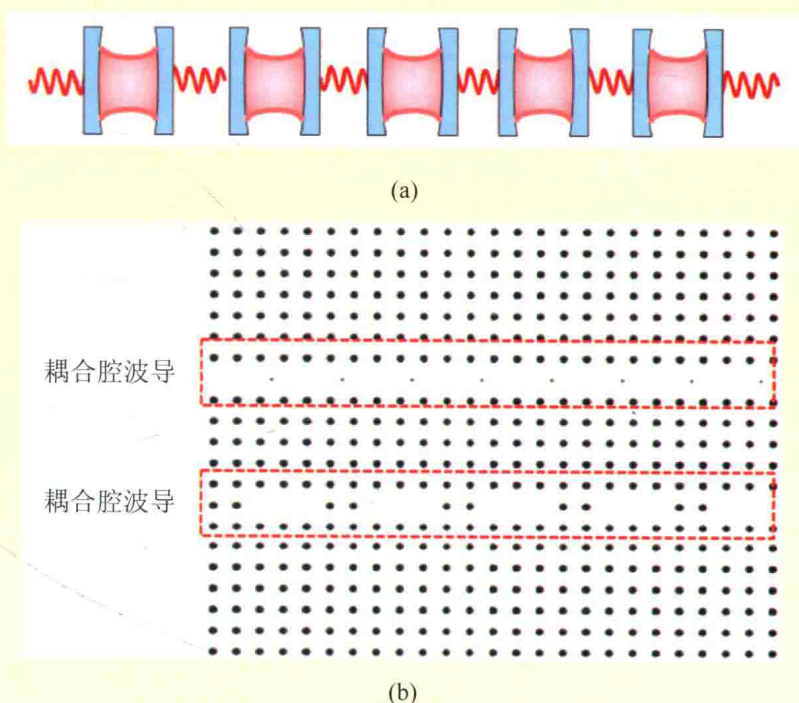


图 8 (a)一维耦合腔波导示意图及(b)光子晶体缺陷腔

当耦合腔波导中的某个腔中有一个光子时，由于相邻腔之间的相互作用，该光子可向左右两边的腔中运动。为了控制单光子在该波导中的运动，可以将一个处在基态的二能级原子(或人工原子)放入其中一个腔中，并使得原子与其所在腔场发生相互作用，如图 10 所示。假设二能级原子嵌入到耦合腔波导中某个腔中。对于能量接近二能级原子跃迁能量 Ω_a 的入射光子，原子与其所在腔场发生相互作用使得单个光子被吸收，然后又被释放到波导中。实质上，对于光子来说，原子就是一个散射中心。原子这种吸收和释放过程等效于在其所嵌入的腔处产生了一个位势。这个位势随着入射光子能量的不同而发生改变：当从左边入射光子能量等于二能级原子跃迁能量 Ω_a 时，位势为无限高的势垒，光子被全反射；当入射光子能量大于(小于) Ω_a 时，则是有限高的势垒(势阱)，光子会被同时反射和透射。换一个角度来看，可以通过调节原子的跃迁频率来打开和关闭单光子的右向运动，因此嵌入的原子就是一个工作在耦合腔波导的单光子开关^[4]。不仅如此，单光子还能被俘获在位势附近，即单光子可处于束缚态(光子将局域在原子所在腔的附近)。单光子束缚态是由于原子的存在破坏了耦合腔的平移不变性和耦合腔波导具有非线性色散所导致的。如图 9(b)描述了整个系统单激发能谱，其中两个独立的能级表示束缚态。

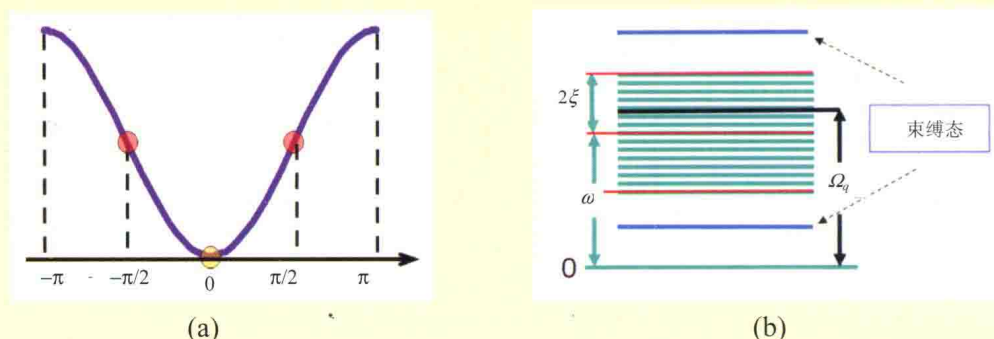


图 9 (a)一维耦合腔波导的色散关系；(b)与二能级系统耦合形成的单激发能谱和束缚态。

ω 表示能带中心， 4ξ 是能带宽度。 Ω_a 是原子跃迁能量。

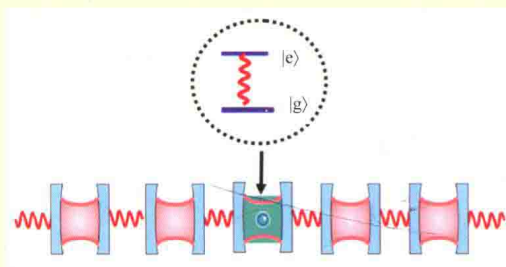


图 10 工作于耦合腔波导中的单光子开关

基于这个理论发现，我们建议了一个基于一维耦合腔链的基本光学器件——单光子“晶体管”^[4]。其实现是将单个原子放入一维耦合腔阵列的某一个腔中，利用二能级系统的跃迁频率控制光子的走向。当入射光子的频率等于原子的跃迁频率时，光子被全反射；当其与原子跃迁频率相距甚远时，光子几乎全部透射。全反射机理是入射波与原子辐射出来的同方向传播的波之间发生干涉相消所致。同时发现光子反射不仅在低能区域显示了 Breit-Wigner 谱型，而且在高能区域展示了 Fano 谱型(见图 11)。所使用研究方法——离散坐标量子散射理论，统一了长波和短波有效场理论所得的结果。

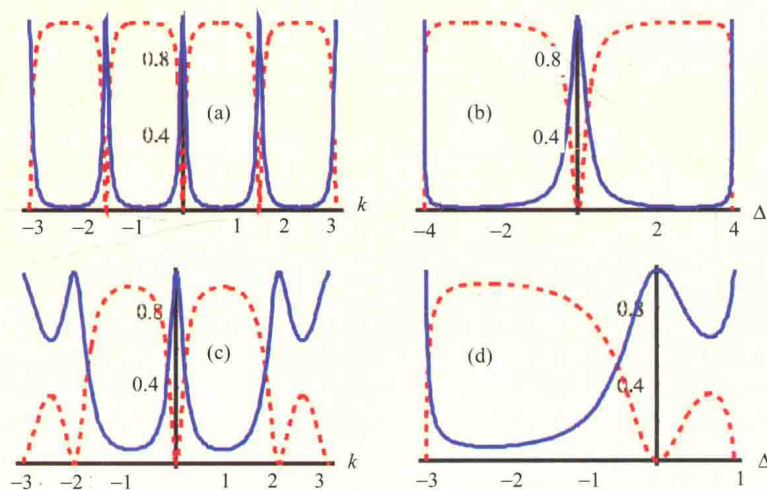


图 11 (a, b) Breit-Wigner 谱型与 (c, d) Fano 谱型

如果在一维耦合腔波导中将两个等同原子分别嵌入到相隔一定距离的两腔中，就产生两个散射中心，各诱导一个局域位势。若单光子在两原子之间的波导段中运动，并且所携带的能量等于原子跃迁能量，那么它将被两个散射中心完全反射，从而完全囚禁在这两个原子之间的波导段中。因此这两个原子相当于构成一个 Fabry-Perot 腔，每个原子是其中的一个镜子。而单光子是在由腔耦合构成的波导中运动，因此以这两个原子为镜的 Fabry-Perot 腔是一个腔链中的腔，称为超腔^[5]。类似于 Fabry-Perot 腔，超腔可以用来存储光子。

3 一维耦合腔波导中单光子频率转换与单光子量子路由

一维波导为单光子提供了传输信道，而在波导中嵌入二能级原子(或人工原子)等物质与光子相互作用，就可以通过对原子的控制实现对单光子传输的相干控制，从而构造单光子器件。随着量子器件发展的更高要求，仅仅控制单光子的透射和反射是不够的。例如：量子通讯要求把光子从一个信道转移到其他信道，即实现光子路由器。进一步，人们更希望信息可以在不同的波段上传播，在不同的信道上能够接收到不同频率的光子。这种频率可变的光子路由器一般是通过光子与非线性介质的相互作用来实现的。

为了实现将单个光子从一个信道转移到空间不同的另外一个信道的量子路由功能，我们利用三能级循环原子构造了一个工作在两个量子信道中的量子路由器^[6]，如图12。

三能级循环原子是指任意两能级之间单光子与双光子跃迁共存的三能级系统，通常不存在于具有空间对称性的天然原子系统中。我们曾经在基于超导磁通量子比特系统中构造出了这种循环结构的人工原子系统^[7]，并针对光驱动的具有循环结构的手性分子系统研究发现了人工规范场分离手性分子的广义Stern-Gerlach效应和提出了手性分子分离方案^[8]。

基于我们在三能级循环系统和一维耦合腔波导的研究工作，如图12所示，我们将一个三能级循环原子嵌入在耦合腔波导a和b的交汇腔中，原子基态到两激发态的跃迁分别与交汇腔中两个腔场耦合，原子激发态之间通过外加经典场耦合，强度为 Ω 。量子网络中的两个量子信道分别由耦合腔波导a和b提供。假设单光子从波导a中左边箭头方向入射。当其运动到交汇腔时，光子可以被处于基态 $|g\rangle$ 的原子吸收而跃迁到激发态 $|e\rangle$ 。此后有两种情况：(1)原子将从激发态 $|e\rangle$ 跃迁到基态 $|g\rangle$ 并释放出一个与原来能量相同的光子到 a_0 腔中，即单光子始终在波导a中运动，无法被转移到波导b中；(2)由于外加经典场的作用，原子将从激发态 $|e\rangle$ 跃迁到激发态 $|f\rangle$ ，随后从 $|f\rangle$ 态跃迁回到基态，并且放出一个与入射光子能量不同的光子到 b_0 腔中，从而实现波导a中的单光子到波导b中的转移。以上讨论表明外加经典场具有打开路由器的功能。然而并不是对所有在波导a中入射的光子都可以被转移到波导b中。耦合腔波导的能谱是带状结构，即具有上下限，只有在带内的光子才能在波导中运动，带外是禁止的。若两波导的能谱无交叠，则无法实现光子从一信道转移到另一信道，因为整个散射过程中，光子的能量无损失，所以从其中一个波导入射的光子无法进入

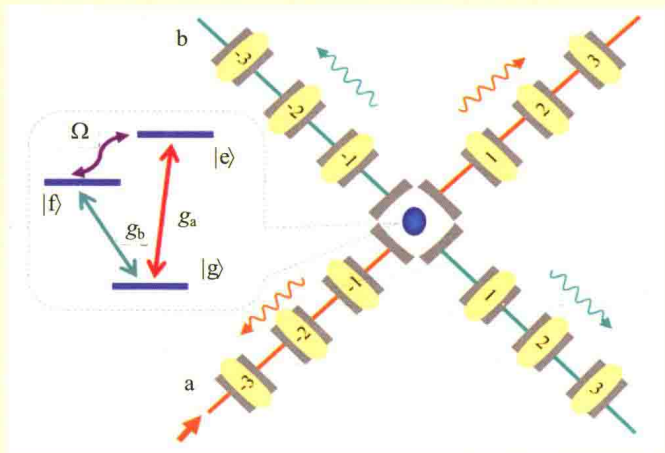


图 12 单光子量子路由器

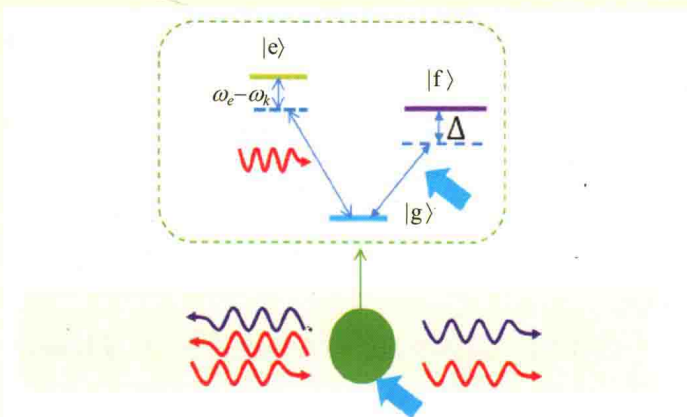


图 13 一个 V 型三能级原子放置在一维耦合腔波导或者波导管中
原子基态到激发态和中间态的跃迁分别与波导光子和外加经典场耦合

到另一波导的能带中。两波导能带有交叠是循环原子能构成量子路由器的首要条件。循环原子形成量子路由器的另一个条件是，经典场产生的两个缀饰态中至少有一个态的能级落在两能带交叠区。

实际上，我们还可以将单个三能级原子(而不是非线性介质)放置在一维波导中来实现一个简单的单光子频率转换器。如图 13 所示，该一维波导可以是具有非线性色散关系的耦合腔波导，也可以是具有线性色散关系的波导管。

在我们的理论方案^[9]中，用一束经典光驱动原子基态 $|g\rangle$ 和中间态 $|f\rangle$ 的跃迁，为原子提供两个能量不同的缀饰态。原子初始制备在能量较低的缀饰态，单光子入射时会被原子吸收而向激发态 $|e\rangle$ 跃迁，然后再由激发态向两个缀饰态跃迁而释放光子。如果原子吸收光子之前和释放光子之后处在同一个缀饰态，出射的光子和入射的光子将携带相同的频率；如果原子前后处在不同的缀饰态，出射的光子频率就会被改变，从而实现光子频率转换器的功能。

我们的研究表明，出射光子与入射光子的频率差和频率转换效率可以通过外加经典场的频率和强度进行方便的控制。当经典场与原子相关跃迁共振时，光子频率转换的效率达到最大。此时，不同信道中传播的光子的频率差等于原子与经典场的耦合强度。在耦合腔波导中，光子在不同信道的能带宽度由腔之间的耦合强度决定，光子频率的转换效率随着驱动光强度的增大而减小，如图 14 所示，当驱动场的强度大于能带宽度时，无法实现光子的频率转换，即频率转换的效率为零。在具有线性色散关系的波导管中，也可以实现类似的频率转换器，此时转换效率可以达到一个较高的水平而不受驱动光场的制约，这是由线性波导中没有上界的能带结构所决定的。

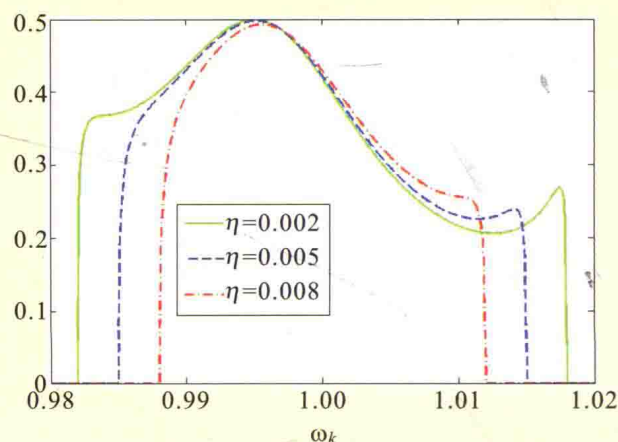


图 14 一维耦合腔波导中单光子入射后的频率转换流随入射光子频率的变化(光子频率 ω_k 以腔场频率 ω 为单位)。这里取经典场与原子相关跃迁共振， η 是经典光场的耦合强度。

科学意义

量子电动力学(QED)是描述光与相互作用的量子理论，当光与物质受限于轻音乐上空间区域时，光与物质间有效耦合变强，导致增强或抑制物质光辐射等各类微腔 QED 效应。这方面的研究不仅在应用上契合了量子信息的发展，而且在基础研究方面有着深刻的物理意义。波导量子电动力学涉及到少数分立能级和连续谱的相互作用，是否存在束缚态和准束缚态的研究涉及不同的物理领域，如在量子场论方面描述重整化必要性的李政道模型，原子分子电离的 Fano 理论，以及凝聚态物理理论模型中安德森杂质诱导局域化问题。

展望

当前在光子晶体缺陷腔与量子点耦合，超导传输线与超导量子比特集成等方面的实验取得了一定的进展，这些研究进展在后续的研究工作中不仅可以检验波导量子电动力学的若干理论预言，而且可以实现基于波导量子电动力学的原型器件。

扩展阅读：

- [1] Huang Jinfeng, Shi Tao, Sun Changpu, et al. Controlling single-photon transport in waveguides with finite cross

- section[J]. *Phys Rev*, 2013, **A88**: 013836.
- [2] Li Qiong, Zhou Lan, Sun Changpu. Waveguide quantum electrodynamics: Controllable channel from quantum interference[J]. *Phys Rev*, 2014, **A89**: 063810.
- [3] Li Qiong, Xu Dazhi, Cai Chengyun, et al. Recoil effects of a motional scatterer on single-photon scattering in one dimension[J]. *Scientific Reports*, 2013, **3**: 3144.
- [4] Zhou Lan, Gong Zhirui, Liu Yuxi, et al. Controllable Scattering of a Single Photon inside a One-Dimensional Resonator Waveguide[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, **101**: 100501 (2008).
- [5] Zhou Lan, Dong Hui, Liu Yuxi, et al. Quantum supercavity with atomic mirrors[J]. *Phys Rev*, 2008, **A78**: 063827.
- [6] Zhou Lan, Yang Liping, Li Yong, et al. Quantum Routing of Single Photons with a Cyclic Three-Level System[J]. *Phys Rev Lett*, 2013, **111**: 103604.
- [7] Liu Yuxi, You Jianqiang, Wei Lianfu, et al. Optical Selection Rules and Phase-Dependent Adiabatic State Control in a Superconducting Quantum Circuit[J]. *Phys Rev Lett*, 2005, **95**: 087001.
- [8] Li Yong, C. Bruder, Sun Changpu. Generalized Stern-Gerlach Effect for Chiral Molecules[J]. *Phys Rev Lett*, 2007, **99**: 130403.
- [9] Wang Zhihai, Zhou Lan, Li Yong, et al. Controllable single-photon frequency converter via a one-dimensional waveguide[J]. *Phys Rev*, 2014, **A89**: 053813.