

基于可调谐 Fano 干涉的超快全光开关*

吴金辉 高锦岳[†]

(吉林大学物理学院 相干光与原子分子光谱教育部重点实验室 长春 130023)

摘要 简要介绍了量子相干和干涉效应的研究动态和一项最新理论研究进展. 设计了一个存在 Fano 类型隧穿感应量子干涉的 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 非对称量子阱结构. 在该量子阱中, 可通过一束控制光抑制量子干涉, 进而调制信号的传播特性. 这一现象可用来实现一个宽带超快全光开关.

关键词 量子光学, 全光开关, 量子相干和干涉, 量子阱

Ultrafast all optical switching via tunable Fano interference

WU Jin-Hui GAO Jin-Yue[†]

(College of Physics, Jilin University, Key Laboratory of Coherent Light and Atomic and Molecular Spectroscopy, Ministry of Education, Changchun 130023, China)

Abstract Quantum coherence and interference are introduced briefly, as well as recent theoretical progress. A GaAs/Al_xGa_{1-x}As asymmetric double quantum well structure with Fano-type tunneling induced quantum interference is proposed, wherein a control light beam can be used to suppress quantum interference and modify the propagation of an optical signal. This phenomenon can be used to realize a broadband ultra-fast optical switch.

Keywords quantum optics, optical switch, quantum coherence and interference, quantum well

量子理论允许一个系统处于其分立状态的叠加态. 当处于叠加态的量子系统进行么正演化时, 在不同状态之间即会产生量子干涉. 研究量子干涉效应有助于进一步理解量子理论的实质, 这一直是科学家们关心的热点之一. 在过去几十年时间里, 人们已经在量子干涉效应的控制和利用方面取得了显著的技术进步. 特别是 20 世纪 80 年代以来, 随着电磁感应光透明^[1]和无反转激光理论^[2]的提出, 量子相干和干涉效应研究开始蓬勃发展, 进入了一个崭新的历史时期. 实现量子相干效应的基本手段是利用外加相干场耦合原子的不同能级, 使其发生关联, 从而在不可分辨的量子跃迁通道之间产生干涉. 量子相干效应可以显著改变介质的自发辐射、吸收和折射率等固有属性. 基于量子相干效应的新现象还有相干粒子数俘获^[3]、高阶非线性增强^[4]、受激拉曼绝热过程^[5]和光群速度减慢^[6]等. 目前, 人们正在积极探索如何利用量子相干效应对单个原子和光子的

量子状态进行有效的操纵和控制, 以实现更加灵活和快速的信息处理^[7]. 这对于推动量子信息、光电子和光通信等领域的发展具有重要意义. 上述基于量子相干效应的现象均是首先在原子气体中预期并观测到的, 但对其潜在应用而言, 全固态解决方案显然更具价值, 也更值得追求和探索. 尽管固体中量子相干效应的实现要更加复杂和困难.

在光通信领域, 使用全光器件进行数据传输和转换是当前大多数研究的终极目标. 为了构建全光网络系统, 显然必须首先找到现存各种微电子器件的光学对应物. 特别是人们提出了一些有价值的建议, 用来实现数据的快速转换, 如基于原子间相互作用^[8]、非线性布拉格衍射^[9]或光子晶体材料^[10]的机制, 以及最近提出的基于量子干涉效应^[11]的机制

* 国家自然科学基金(批准号:10334010,10404009)资助项目
2005-08-09 收到

[†] 通讯联系人. Email: jygao@mail.jlu.edu.cn

等. 基于量子干涉效应的机制由于不涉及电子的实际激发而有较高的效率. 在 Harris 和 Yamamoto^[12] 首次提出利用四能级原子系统中的量子干涉效应实现吸收型的全光开关这一概念之后, Yan 等人^[13] 通过实验证实了这一想法的可行性. 只是几乎无人进一步认真考虑如何在各种固体材料中实现这一想法^[14]. 半导体量子阱结构具有类似于原子的分立能态, 而且其能级结构可以根据实际需要进行设计, 具有较大的灵活性, 非常适合于再现原子介质中观察到的量子干涉现象并实现其潜在的应用价值.

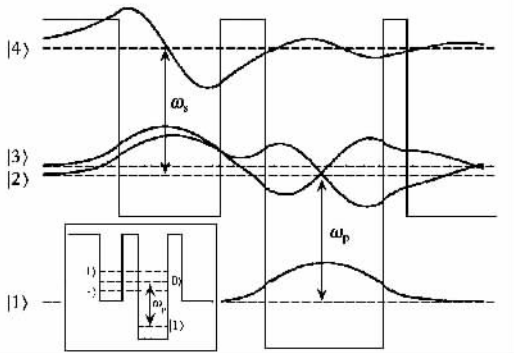


图1 一个非对称量子阱的能带结构和波函数(大图对应裸态, 小图对应缓饰态)

吴金辉、高锦岳和意大利学者合作研究, 在量子相干效应的理论研究中取得进展, 原则上验证了非对称量子阱结构中的可调谐隧穿感应量子干涉, 可用来实现在低温下工作的新型、高效、宽带、超快光学开关, 其论文已在 Phys. Rev. Lett. 上发表^[15]. 他们结合实际工艺水平设计了一个非对称的 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 双量子阱结构(见图1). 浅阱的基态和深阱的第一激发态通过隧穿效应而混合产生了两个新的能态|2 和|3. 频率分别为 ω_s 和 ω_p 的两个相干场(控制光和信号光)将这两个中间能态分别与浅阱的第一激发态|4 和深阱的基态|1 耦合起来. 当两个相干场均关闭时, |1 是唯一有电子分布的能态, 其电子布局可通过远处杂质进行 n 型掺杂来实现. 能态|1—|4 的能量值和弛豫速率可通过求解有效质量薛定谔方程在无穷远处输出波的特征值而获得^[16], 其大小可通过改变薄层厚度和 Al 的掺杂比例来控制. 能态|2 和|3 的电子波函数通过隧穿效应和最右侧的连续态耦合. 由于无法完全区分能态|2 和|3, 因此由它们到连续态的电子弛豫导致了 Fano 类型的量子干涉, 其大小取决于相应的电子弛豫速率及各种散射过程导致的退相干过程^[17]. 为了抑制各种散射过程导致的退相干过程, 使电子

弛豫过程在能级加宽机制中占主导地位, 从而获得较佳的量子干涉效应, 需要使该量子阱结构工作在小于 10K 的低温环境中.

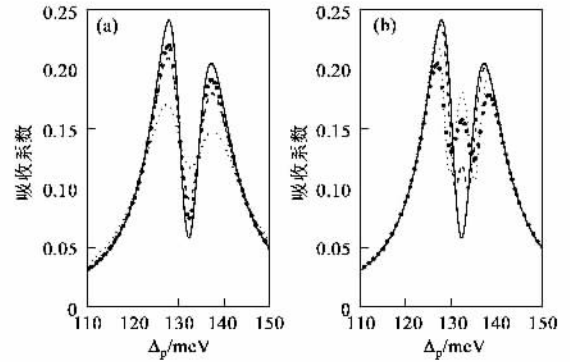


图2 (a)关闭控制光时不同退相干参数下的探测吸收光谱; (b)不同强度控制光作用下的探测吸收光谱

具体处理方法是: 首先采用相对简单的薛定谔-麦克斯韦耦合方程研究控制光和信号光在量子阱结构中的传播特性(该方法有助于洞察信号光传播特性变化的物理实质), 然后再通过与完全的二维数值模型结果进行比较, 验证其可行性. 图2(a)对应控制光关闭时的探测吸收光谱, 其中不同曲线对应不同的退相干参数, 即不同的环境温度. 显然, 由于隧穿感应量子干涉的存在, 在能态|2 和|3 中间的频率处, 探测光的吸收受到了抑制, 而且散射过程导致的退相干参数越小(温度越低), 吸收系数越小. 图2(b)对应控制光打开时的探测吸收光谱, 其中不同曲线对应不同的控制光强度. 由于控制光破坏了隧穿感应量子干涉, 并在能态|2 和|3 中间产生了一个新的跃迁通道(见图1), 因此出现了一个新的吸收峰, 其宽度大约为 1THz, 而且吸收峰高度与控制光强度成正比. 图2中没有连线的数据点对应完全的二维数值模型结果. 图3显示的是控制光作用下信号光透射特性的时间演化规律. 随着控制光的打开和关闭, 信号光的透射特性呈周期性变化, 其响应和恢复时间大约为 1ps.

值得注意的是, 当打开控制光时, 为了使信号光的透射率降低至一定水平, 从而获得明显的开关效果, 信号光的传播常数必须足够大. 信号光的传播常数与量子阱结构的厚度和其中的电子密度有关. 对于通常的电子密度, 单层量子阱结构的厚度显然是不够的, 必需采用多层量子阱结构并将其置于光学谐振腔之中^[18]. 基于 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 材料的全光开关工作中红外波段. 为了获得光通信波段的全

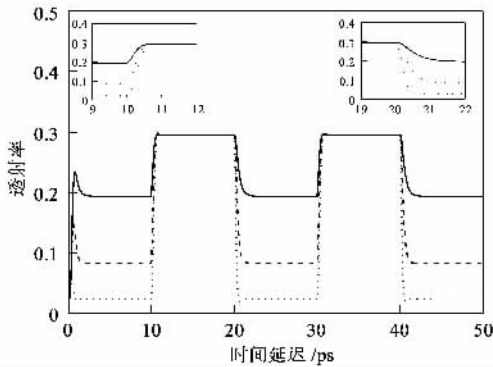


图3 不同强度控制光调制情况下信号光透射特性的时间演化规律

光开关 可采用 $\text{GaN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 或 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{AlAs}$ 材料. 这项研究成果有助于进一步理解相干光与量子阱材料的相互作用过程, 对于最终实现基于量子干涉效应的超快光学开关具有重要的指导意义, 对于设计其他基于量子干涉效应的光电子器件也将有 很大启迪.

参 考 文 献

[1] Harris S E. *Phys. Today*, 1997, 50 (7) : 36

[2] Zibrov A S , Lukin M D , Nikonov D E *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 1995 , 75 : 1499
 [3] Arimondo E. *Progress in Optics XXXV* , Elsevier Science , Amsterdam , 1996
 [4] Schmidt H , Imamoglu A. *Opt. Lett.* , 1996 , 21 : 1936
 [5] Bergmann K , Theuer H , Shore B W. *Rev. Mod. Phys.* , 1998 , 70 : 1003
 [6] Hau L V , Harris S E , Dutton Z *et al.* *Nature (London)* , 1999 , 397 : 594
 [7] Lukin M D. *Rev. Mod. Phys.* , 2003 , 75 : 457
 [8] Manka A S , Dowling J P , Bowden C M *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 1994 , 73 : 1789
 [9] Pan G , Kesavamoorthy R , Asher S A. *Phys. Rev. Lett.* , 1997 , 78 : 3860
 [10] Leonard S W , van Driel H M , Schilling J *et al.* *Phys. Rev. B* , 2002 , 66 : 161102
 [11] Schmidt H , Ram R J. *Appl. Phys. Lett.* , 2000 , 76 : 3173
 [12] Harris S E , Yamamoto Y. *Phys. Rev. Lett.* , 1998 , 81 : 3611
 [13] Yan M , Rickey E G , Zhu Y. *Phys. Rev. A* , 2001 , 64 : 041801
 [14] Su X-M , Gao J-Y. *Phys. Lett. A* , 2000 , 264 : 346
 [15] Wu J-H , Gao J-Y , Xu J-H *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2005 , 95 : 057401
 [16] Ahn D , Chuang S L. *Phys. Rev. B* , 1986 , 34 : R9034
 [17] Faist J , Capasso F , Sirtori C *et al.* *Nature (London)* , 1997 , 390 : 589
 [18] Dini D , Kohler R , Tredicucci A *et al.* *Phys. Rev. Lett.* , 2003 , 90 : 116401

· 招生招聘 ·



Rensselaer

美国伦斯勒理工学院招生信息

Troy , New York , U. S. A.

February , 2006

JOIN OUR GRADUATE SCHOOL IN PHYSICS

Ph. D. in Department of Physics , Applied Physics , and Astronomy

Areas of research : Terahertz Imaging and spectroscopy , Terascale Electronics , Photonic bandgap structures , nanoelectronic quantum structures , Bio-physics , Origins of Life , Astronomy , Elementary Particles Physics. Teaching , research assistantships , and fellowships are available.

Application : <http://www.rpi.edu/dept/grad-services/>

Information : <http://www.rpi.edu/dept/phys/>

Email : gradphysics@rpi.edu