

文章编号 : 0253-2239(2002)07-0870-04

基于 GaAs-AlGaAs 非对称耦合量子阱材料的 半导体弱光开关*

苏雪梅¹⁾²⁾ 卓仲畅¹⁾ 宁永强²⁾ 王立军²⁾

(1), 吉林大学物理系, 长春 130023
(2), 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130022)

摘要: 提出了一种基于在 GaAs-AlGaAs 非对称耦合量子阱材料子带跃迁的量子干涉的半导体弱光开关。分析了弛豫速率 γ_{21} 对光开关的影响。这种半导体弱光开关是半导体超晶格材料共振隧穿作用导致的子带跃迁的 Fano 干涉的结果。由于半导体结构与材料可以人为地选择, 相干强度可以控制和改变, 这种半导体弱光开关比采用原子系统更实用。这也是一种在半导体材料中实现一束光控制另一束光的方法。

关键词: 耦合量子阱; Fano 干涉; 光开关

中图分类号: O431.2 文献标识码: A

1 引 言

最近十几年, 以电磁感应光透明为主要特征的量子干涉效应已经在气体原子^[1,2]、掺杂稀有离子的固体^[3]、等离子体^[4,5]以及半导体量子阱材料^[6]等各种介质中被广泛讨论。与之相关的应用包括无反转光放大^[7]、共振提高非线性极化率^[8]、电磁感应光栅^[9]等等。在这篇文章中, 我们讨论量子干涉效应的另一种应用, 即一种基于在 GaAs-AlGaAs 非对称耦合量子阱材料子带跃迁的量子干涉的半导体弱光开关。这种光开关的机制不同于文献 [10] 且具有开关强度小的优点, 文献 [10] 中的光开关使用了量子阱材料大的光学非线性。

自 GaAs-AlGaAs 子带跃迁 1985 年首次报道以来, 波长在 $8 \mu\text{m} \sim 14 \mu\text{m}$ 的 GaAs-AlGaAs 子带跃迁在各种应用中被观察到了^[11,12]。基于 GaAs-AlGaAs 非对称耦合量子阱材料子带跃迁的量子干涉的光透明理论和实验最近也被报道^[13~16]。

2 理论分析

我们这种光开关所采用的非对称耦合量子阱导带四能级结构, 导带能级简图如图 1(a) 所示。浅阱

($\text{Al}_{0.14}\text{Ga}_{0.86}\text{As}$) 的第一个子带 |2 与深阱(宽度为 9.5 nm 的 GaAs) 的第二个子带 |3, 通过两阱之间的薄势垒(宽度 1.8 nm 的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$) 的耦合隧穿作用, 产生一对劈裂能级。由加在势垒上的偏置电压可以改变薄势垒的高度和宽度, 这种改变控制劈裂的强度和宽度。在深阱的另一侧是一个宽度为 1.5 nm 的薄势垒($\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$), 通过它的隧穿作用, |2 和 |3 向同一连续态弛豫。从而使 |1 到 |3 和 |1 到 |2 两个子带跃迁产生 Fano 干涉。为了进行比较, 我们计算两个样品 A 和 B, 浅阱的宽度分别取 9 nm 和 12 nm。

在图 1 中, 深阱的第一个子带和浅阱的第二个子带分别表示为 |1 和 |4, 探测光脉冲和开关光脉冲的频率分别为 ω_p 和 ω_s , 并且分别与 |1 到 |3 和 |2 到 |4 的子带吸收跃迁共振。等效的结构图如图 1(b) 所示。当不加开关场 ω_s 时, 量子干涉的结果使探测场 ω_p 透明, 光开关处于“开”的状态, 加了开关场之后, 量子干涉被破坏, 因此探测光被吸收, 光开关处于“关”的状态。这里使用的半导体四能级系统类似于哈里斯(Harris)的原子四能级系统^[17]。原子系统 |2 和 |3 之间的外加相干场的耦合作用在这里被耦合隧穿结构所取代, 结构本身具有的特性使我们的光开关更具优势。

在文献 [18] 中, 我们针对图 1 所示的导带四能级结构, 由薛定谔方程和麦克斯韦方程出发, 得到了在开关场作用下, 探测光在介质中的透过率为

* 国家自然科学基金(19974047)、吉林大学青年基金(2000A04)资助课题。

E-mail: xuxmsu@public.cc.jl.cn

收稿日期 2001-05-09; 收到修改稿日期 2001-08-16

$$2aL = NL\sigma_{13} \frac{(W_s + \gamma_{12} \chi W_s + 2W_c + \gamma_{12}) + \Delta\omega_p^2}{(W_s + 2W_c + \gamma_{12}) \chi + \Delta\omega_p^2} \quad (1)$$

N 为单位体积内的电子数密度, L 为材料长度, σ_{13} 为吸收截面, $NL\sigma_{13}$ 定义为探测场的光学吸收长度。探测场的频率失谐量 $\Delta\omega_p = \omega_p - (\omega_3 - \omega_1) \chi W_p = \Omega_p^2 / (2\gamma_{13})$, $W_s = \Omega_s^2 / (2\gamma_{24})$, $W_c = \Omega_c^2 / (2\gamma_{23})$ 定义为探测场、开关场及耦合场的跃迁率。探测场和开关场相应的拉比 (Rabi) 频率分别为 Ω_p 和 Ω_s , 另一个量 $\Omega_c = (\Gamma_2 \Gamma_3)^{1/2} / 2$ 表示能级 $|2\rangle$ 的衰变弛豫将驱动能级 $|3\rangle$, 反过来 $|3\rangle$ 的衰变弛豫将驱动能级 $|2\rangle$ 。这一项的产生是因为 $|2\rangle$ 和 $|3\rangle$ 衰变到同一连续态, 因此它们相互耦合。 γ_{13} , γ_{12} 和 γ_{24} 为相应的弛豫线宽, 这些线宽主要来源于子带间的声子散射、电子-电子散射、表面粗糙散射以及晶格组合散射的贡献。我们需要尽可能地减小这些弛豫的贡献, 以便提高由纵向光致声子发射确定的寿命加宽跃迁的 Fano 干涉的效率。由于 $|2\rangle$ 到 $|1\rangle$ 间的弛豫速率 γ_{21} 正比于浅阱阱宽的负 6 次方^[19], 样品 A 中 γ_{21} 大约是样品 B 的 2.4 倍。

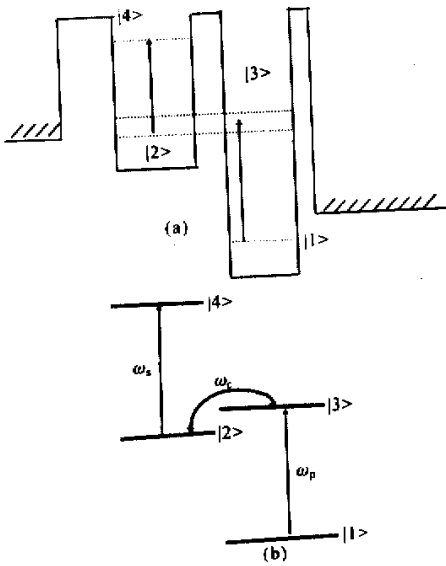


Fig.1 (a) Subband energy four-level diagram for double quantum well. The first subband of shallow well is resonant to the second subband of deep well by resonant tunneling via an ultra-thin barrier between two wells. The probe and switch pulse are in resonance with transition $|1\rangle$ to $|3\rangle$ and $|2\rangle$ to $|4\rangle$, respectively, (b) Equivalent atomic four-level system

关于 GaAs-Al_xGa_{1-x}As 材料, 当 Al 的掺杂浓度 $x < 0.45$ 时, 带隙

$$E_g = 1.519 + 1.425x - 0.90x^2 + 1.10x^3 \text{ eV},$$

电子的有效质量与静止质量之比

$$m^* / m_0 = 0.0665 + 0.0835x,$$

导带带阶 ΔE_c 与价带带阶 ΔE_v 取实验值, $\Delta E_c : \Delta E_v = 0.6 : 0.4$ 。由于 GaAs-Al_xGa_{1-x}As 量子阱子带跃迁波长最小在 $\lambda = 5.6 \mu\text{m}$, 我们的光开关工作中远红外光谱范围。对于我们前面选定的样品, 工作波长在 $10 \mu\text{m}$ 附近。如果将此光开关用于光通信, 工作波长在 $1.55 \mu\text{m}$ 左右, 双量子阱材料应选择导带带阶大的材料, 如 GaN/Al_xGa_{1-x}N, In_xGa_{1-x}As/AlAs 耦合双量子阱结构材料。

3 讨 论

光开关特性可以根据 (1) 式计算。我们分别用样品 A 和 B 作为我们的光开关介质。对于样品 A, 探测光透过率随失谐量 $\Delta\omega_p$ 变化的曲线表示在图 2(a) 中。图中所用参数除光学长度选为 $NL\sigma_{13} = 10$ 其余参数可以通过传输矩阵法计算。图中曲线 a 表示光开关处于“开”的状态 ($W_s = 0$), 曲线 b 表示光开关处于“关”的状态 ($W_s = 0.2W_c$)。图 2(b) 是关于样品 B 的结果, 图中所示结果说明这种用耦合量子阱材料设计的光开关是可行的。

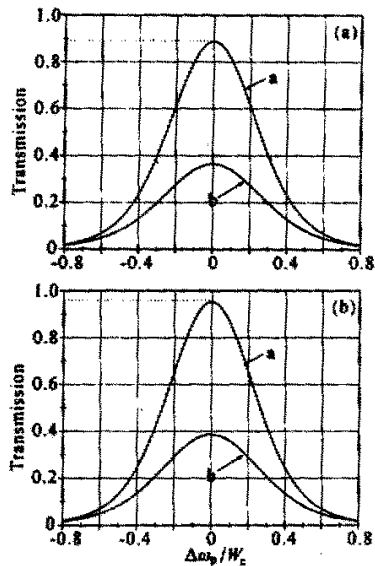


Fig.2 Transmission of the probe pulse vs detuning $\Delta\omega_p$. a Switch is open ($W_s = 0$); b: switch is closed ($W_s = 0.2W_c$). (a) For sample A; (b) For sample B. The parameters used are $\Omega_c = 17.6 \text{ meV}$, $NL\sigma_{13} = 10$; $\gamma_{23} = 2.0 \text{ meV}$, $\gamma_{12} = 3.6 \text{ meV}$ (a) and $\gamma_{12} = 1.5 \text{ meV}$ (b)

这里关于图 2 所示结果还需要强调几点。

1) 由于相对大的弛豫率 γ_{12} 使得图 2(a) 所示的最大透过率小于 90%。这是因为 γ_{12} 的增加会降低量子干涉程度。在原子系统中, 为了减少 γ_{12} , 能级 |2> 选择亚稳态。在我们的半导体耦合量子阱的结构中, 增加浅阱的宽度, 可以提高 γ_{12} 。选用样品 B, 透过率明显增加到 95% 以上。如图 2(b) 所示。

2) 另外需要强调的一点是使探测光脉冲“关闭”的开关场的临界强度。当 $W_s = 0.2W_c$ 时, 开关场的拉比频率 $\Omega_s \approx 0.1\Omega_c$ 的大小在 10^{11} Hz 量级, 这在原子系统是难以想象的!

但是, 对于我们的半导体结构, 非常大的电偶极矩阵元 (约 10^{-8} cm) 使得所需开关脉冲的强度足够弱, 在 10^6 W/cm² 量级。

3) 由 GaAs-AlGaAs 材料的带隙决定, 这种基于 GaAs-AlGaAs 非对称耦合量子阱材料的半导体弱光开关, 工作中远红外范围。本文所选择样品工作波长在 $10 \mu\text{m}$ 。

结论 在这篇文章里, 我们研究并证明了 GaAs-AlGaAs 半导体耦合双量子阱材料的光开关设想。这种半导体弱光开关比采用原子系统更实用, 因为半导体结构与材料可以人为地选择, 相干强度可以控制和改变。这是半导体超晶格材料共振隧穿作用导致的子带跃迁的 Fano 干涉的结果。这也是一种在半导体材料中实现一束光控制另一束光的方法。

参 考 文 献

- [1] Field J E, Hahn K H, Harris S E. Observation of electromagnetically induced transparency in collisionally broadened lead vapor. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **67**(22): 3062~3065
- [2] Boller K J, Imamoglu A, Harris S E. Observation of electromagnetically induced transparency. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **66**(20): 2593~2596
- [3] Zhao Yang, Wu Cunkai, Ham B S *et al.*. Microwave induced transparency in Ruby. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **79**(4): 641~644
- [4] Harris S E. Electromagnetically induced transparency in an ideal plasma. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(27): 5357~5360
- [5] Su Xuemei, Dong Po, Gao Jinyue *et al.*.

- Electromagnetically induced transparency in a non-uniform plasma. *European Phys. J. (D)*, 2000, **12**(1): 193~196
- [6] Imamoglu A, Ram R J. Semiconductor lasers without population inversion. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(21): 1744~1746
- [7] Arkhipikin V G, Heller T I. Radiation amplification without population inversion at transitions to autoionizing states. *Phys. Lett.*, 1983, **98A**(1~2): 12~14
- [8] Harris S E, Field J E, Imamoglu A. Nonlinear optical processes using electromagnetically induced transparency. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **64**(10): 1107~1110
- [9] Ling Hongyuan, Li Yongqing, Xiao Min. Electromagnetically induced grating: Homogeneously broadened medium. *Phys. Rev. (A)*, 1998, **57**(2): 1338~1344
- [10] Takahashi R, Kawamura Y, Iwamura H. Ultrafast $1.55 \mu\text{m}$ all-optical switching using low-temperature-grown multiple quantum wells. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(2): 153~155
- [11] West L C, Eglash S J. First observation of an extremely large-dipole infrared transition within the conduction band of a GaAs quantum well. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, **46**(11): 1156~1158
- [12] Harwit A, Harris Jr J S. Observation of stark shifts in quantum well intersubband transitions. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **50**(11): 685~687
- [13] Schmidt H, Campman K L, Gossard A C *et al.*. Tunneling induced transparency: Fano interference in intersubband transitions. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(25): 3455~3457
- [14] Faist J, Sirtori C, Capasso F *et al.*. Tunable Fano interference in intersubband absorption. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(13): 985~987
- [15] Faist J, Capasso F, Sirtori C *et al.*. Intersubband emission in double-well structures with quantum interference in absorption. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(24): 3477~3479
- [16] Faist J, Capasso F, Sirtori C *et al.*. Controlling the sign of quantum interference by tunnelling from quantum wells. *Nature*, 1997, **390**(6660): 589~591
- [17] Harris S E, Yamamoto Y. Photon switching by quantum interference. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**(17): 3611~3614
- [18] Su Xuemei, Gao Jinyue. Optical switching based on transparency in a semiconductor double-quantum well. *Phys. Lett. (A)*, 2000, **264**(5): 346~349
- [19] Sakaki H, Noda T, Hirakawa K *et al.*. Interface roughness scattering in GaAs/AlAs quantum wells. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**(23): 1934~1936

A Weak Optical Switch in GaAs-AlGaAs Asymmetric Coupled Quantum Wells

Su Xuemei¹⁾²⁾ Zhuo Zhongchang¹⁾ Ning Yongqiang²⁾ Wang Lijun²⁾

(1), Department of Physics Jilin University, Changchun 130023
(2), Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021

(Received 9 May 2001 ; revised 16 August 2001)

Abstract : A scheme of a weak optical switch in GaAs-AlGaAs asymmetric coupled quantum wells is proposed. The effect of dephasing rate γ_{21} on the switch is analyzed. The optical switch is induced by Fano interference in coherent effects between inter-subbands in superlattices. This weak semiconductor switch is more practical than that of atomic media due to its flexibility for choosing materials and structure dimensions of the utilized heterostructures. This is also a method of controlling one beam by another in semiconductor.

Key words : coupled quantum wells ; Fano interference ; optical switch