

量子限制斯塔克效应及其在光开关中的应用

徐枝新^{1,2}, 王明华², 江晓清², 周 强², 杨爱龄²

(1. 浙江科技学院 理学系, 浙江 杭州 310023; 2. 浙江大学 信电系光电子所, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 介绍了量子限制斯塔克效应(QCSE)的主要内容, 给出了 QCSE 在快速 2×2 Mach-Zehnder 光空间开关中的应用, 并通过光开关性能的分析, 指出用矩形量子阱结构的光开关的缺点, 最后提出采用 FACQW'S 的解决办法。

关键词: 量子限制斯塔克效应; 光开关; 吸收损耗; 量子阱

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1671-8798(2004)04-0232-04

当外电场平行作用于量子阱材料时, 它表现出与体材料相似的电吸收性质, 吸收边移动和加宽就是 Franz-Keldysh 效应。但是, 当外电场垂直作用于量子阱材料时, 情形与平行场有很大不同, 这个新机制叫量子限制斯塔克效应(quantum-confined stark effect, 以下简称 QCSE)。

1 QCSE 的主要内容

1.1 吸收边随外电场红移

以 GaAs/AlGaAs 多量子阱为例, 该结构由 10 个周期的 100 \AA GaAs 和 150 \AA AlGaAs 组成, 在 AlGaAs 中, Al 的克分子数是 0.4。吸收边随外电场 F 变化, 见图 1。图 1 中从左到右分别表示外场 0, 30, 60, 90 kV/cm 时的吸收谱。

从图 1 可以看出, 随外场的增加, 吸收边向低能方向移动(红移)越大。利用有限深量子阱理论和有效质量近似可以得到和实验相吻合的结果: 当外场 F 不太大时, 能量移动可表示为:

$$\Delta E_1 = -\frac{\Omega^2}{8} \frac{m^* e^2 F^2 L^4}{\hbar^2} \Omega(k_0, q_0) = \left[1 + \frac{\sin k_0}{k_0} + \frac{2}{q_0} \cos^2 \left(\frac{k_0}{2} \right) \right]^{-1} \left[\frac{1}{3} + \frac{\sin k_0}{k_0} + \frac{2 \cos k_0}{k_0^2} - \frac{2 \sin k_0}{k_0^3} + \frac{2}{q_0} \left(1 + \frac{2}{q} + \frac{2}{q^2} \right) \cos^2 \left(\frac{k_0}{2} \right) \right]$$

$$k_0 = \frac{2m^* L^2}{\hbar^2} E_1^{[1]}$$

上式中, E_1 是量子阱中没有外场(微扰)时激子的基态能量, m^* 是激子有效质量, e 是电子所带电量, F 是外场电场强度, L 为有效阱宽, $\hbar = h/2\pi$, h 是 Plank 常数。

1.2 在吸收边附近, 量子阱材料的吸收系数 $\Delta\alpha$ 和折射率变化 Δn 有很大的值

以 GaAs/AlGaAs 矩形量子阱(RQW)为例, 入射光为 TE 模, TM 模情况与 TE 模基本相似。图 2 表示在

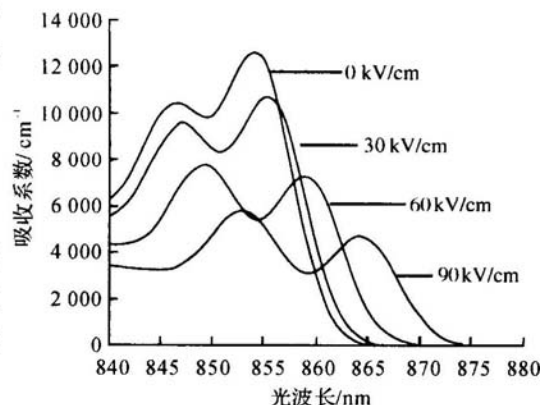


图 1 吸收边随外电场变化

收稿日期: 2004-04-05

作者简介: 徐枝新(1972—), 男, 浙江衢州人, 讲师, 浙江大学信电系微电子学与固体电子学在读博士, 主要从事通信领域量子阱光开关电光特性的计算机仿真和高速光开关的设计工作。

外电场分别为 60, 90 kV/cm 时, 折射率变化 Δn 随波长变化的曲线; 图 3 表示外电场分别为 60, 90 kV/cm 产生的吸收系数变化 $\Delta\alpha$ 。

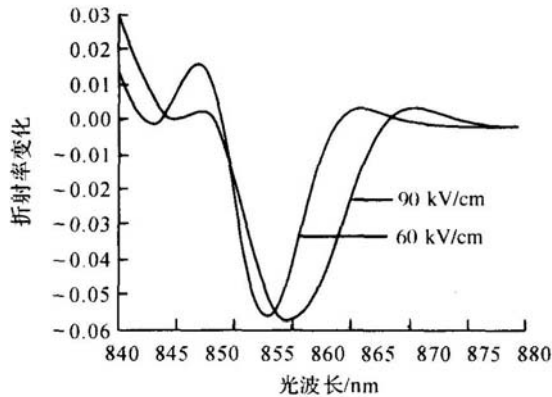


图2 在外电场 60, 90 kV/cm 时折射率变化

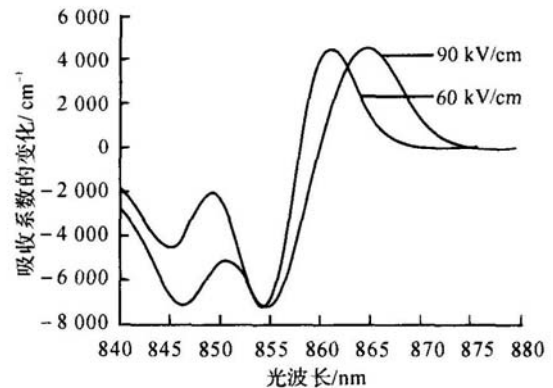


图3 在外电场 60, 90 kV/cm 时吸收系数的变化

1.3 吸收系数变化 $\Delta\alpha$ 和折射率变化 Δn 有很强光偏振模式依赖性

以 GaAs/Al_{0.4}Ga_{0.6}As 矩形量子阱为例。从图 4^[2] 可以看出: 当阱宽减小时, 折射率变化 Δn 的峰之间波长间隙变大, 频谱响应偏振依赖更加脱出。

解释如下: ①对 TM 模, 峰主要来自于 e-lh 跃迁的贡献; 而对 TE 模, 峰主要来自于 e-hh 跃迁的贡献。②阱宽减小, 不仅加大了子带能量间隔, 而且跟 e-hh 和 e-lh 跃迁有关的偶极矩更加偏振依赖化。

2 QCSE 在光开关中的应用

2.1 光开关对半导体材料的要求

(1) 光开关不工作时材料吸收损耗尽量小, 工作时材料折射率要大, 后者有利于集成。大量的实验结果和理论分析都表明^[3]: 在相同工作条件下, 量子阱材料折射率比体材料大一个数量级。在寻求大的折射率方面, 量子阱材料是有优势的。

(2) 光开关对输入的光信号模式偏振无关。这是因为现在用于光通信领域的光纤考虑到成本等因素, 大多数是不保偏的。但是从 1.3 可以看到: 量子阱材料具有很强的模式依赖性, 阱宽越窄, 模式依赖性越强。这样必须对量子阱材料进行适当改造, 使之偏振无关化。

(3) 开关速度要高。这一方面是量子阱材料的又一大优势, 带间跃迁 (interband transitions) 速度超过 ns 级, 子带间跃迁^[4] (intersubband transitions) 更是可达 ps 级。

(4) 消光比 (Extinction ratio) 尽可能大, 一般应大于 18 dB。

另外, 对半导体材料如串扰 (crosstalk)、可靠性、耐温性、能量利用率等方面都有一定要求。

2.2 对量子阱材料进行拉应力处理, 以实现应力平衡和偏振无关化

以 20 个周期的 In_xGa_{1-x}As/InP 多量子阱^[5]为例: In_xGa_{1-x}As 层厚度 11.5 nm, InP 层厚度 11 nm。调整 x 的值, 可实现拉应力值的改变, 从而调整材料的光偏振性。当 $x=0.53, 0.51, 0.49$ 时, 拉应力分别为 0, -0.15%, -0.30%, 吸收系数变化 $\Delta\alpha$ 随外场变化曲线^[5] 如图 5 所示。

从图 5 可以看出: $x=0.49$ 量子阱偏振无关 (polarization-independence) 性最好, $x=0.51$ 次之, $x=0.53$ 最差。

拉应力处理的物理机制: ①在没有应力 (unstrained) 的量子阱中,

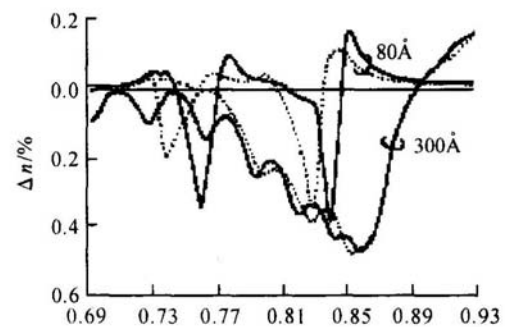


图4 GaAs/GaAlAs 折射率变化的 TE/TM 模谱
实线为 TE 模; 虚线为 TM 模; 外场 $F = 10 \text{ V}/\mu\text{m}$

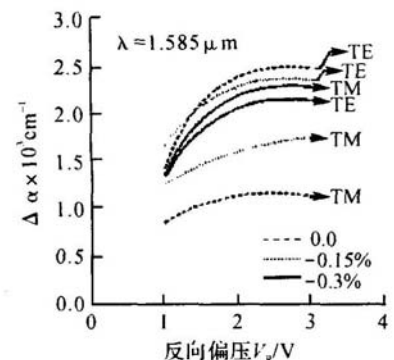


图5 吸收系数变化与外场依赖关系

重空穴带能量低于轻空穴带能量。②当拉应力被应用时,轻空穴带在能量上因为应力的切变成分被压下,而重空穴带被拉上来;这个联合效应导致两个分离的价带更加靠近。

2.3 基于 QCSE 的多量子阱结构的快速 2×2 M-Z 型光空间开关

多量子阱由 20 个周期 8-nm InGaAsP($\lambda_c=1.55 \mu\text{m}$)阱/6-nm InP 阻挡层组成;MMI 3-dB 耦合器,长和宽分别为 $380 \mu\text{m}$ 和 $9 \mu\text{m}$;相移部分长度 500 nm 。

图 6 给出了光空间开关的结构示意图和 a-a' 剖面图。

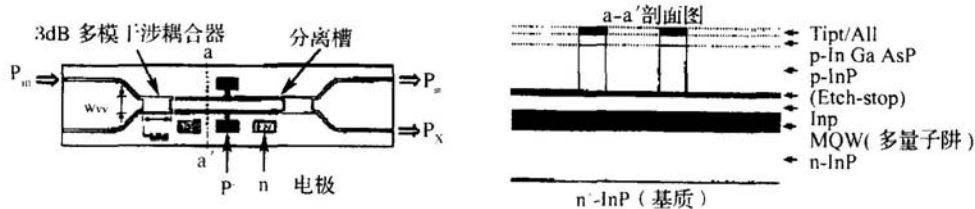


图 6 光空间开关的结构示意图和 a-a' 剖面图

实验结果:工作波长 $1.575 \mu\text{m}$;工作电压 -6.3 V ;开关速度不低于 10 GHz ;消光比直通 19 dB ,交叉 15 dB ;带宽/电压 2.2 GHz/V 。

结果中没有给出吸收损耗,是由于吸收边红移,使得在更长的工作波长区域($1.55 \mu\text{m}$)吸收损耗大为增加,甚至超过体材料。另外,由于低于吸收边的电吸收的存在,消光比也不是很高。

3 改进措施

采用在外场作用下无吸收边红移的五阶非对称耦合量子阱(five-step asymmetric coupled quantum wells, 简称 FACQW'S)^[6],不仅可以大大降低吸收损耗,而且折射率比上述实验中采用的矩形量子阱(RQW)高出一个数量级。

FACQW'S 层结构和波函数的场诱导变化见图 7。

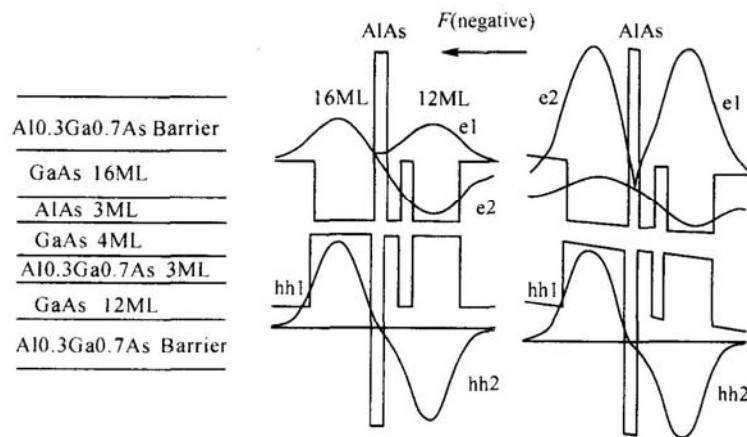


图 7 FACQW'S 层结构和波函数的场诱导变化图

在偏压下,吸收边没有红移和折射率变化 Δn 很大的物理机制:①由于量子阱中两个插入的阻挡层(3ML AlAs 和 3ML AlGaAs)和 4ML GaAs 阱共同作用,使得各能级的电子和空穴间的跃迁能量尽可能地相互靠近;②AlAs 高势垒能增加 $e1-hh2$ 和 $e2-hh1$ 跃迁的激子束缚能和激子吸收强度。

4 展望

虽然基于 QCSE 的矩形量子阱光开关吸收损耗很大,而且消光比也不是很高,但是只要从量子阱材料的选取,特别是结构的优化等方面下功夫,比如采用五阶非对称量子阱没有红移的特点就可以降低吸收损耗,而且五阶非对称量子阱在相同外电场作用下折射率变化比矩形量子阱大一个量级,从而提高了集成度。

所以一定能制造出高速、高消光比、高集成化、低损耗的适用于通讯领域的光开关阵列来。

参考文献:

- [1] Bastard G, Mendez E E, Chang L L, *et al.* Variational calculations on a quantum well in an electric field[J]. *PHYSICAL REVIEW B*, 1983, 28(6): 3241—3245.
- [2] Chong T C, Wan H W, Choa S J. Polarisation dependence of field-induced refractive index variation in strained and unstrained quantum well structures[J]. *Electronics Letters*, 1990, 26(14): 1060—1061.
- [3] Miller D A B, Chemla D S, Damen T C. Electric field dependence of optical absorption near the band gap of quantum-well structures[J]. *PHYSICAL REVIEW B*, 1985, 32(2): 1043—1060.
- [4] Tomoyuki Akiyama, Nikolai Georgiev, Teruo Mozume, *et al.* 1.55 μm Picosecond All-Optical Switching by Using Intersubband Absorption in InGaAs-AlAs-AlAsSb Coupled Quantum Wells[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2002, 14(4): 495—497.
- [5] Ravikumar K G, Aizawa T, Suzaki S, *et al.* Observation of polarization independent electric field effect in InGaAs/InP tensile strained quantum well and its proposal for optical switch[J]. *Appl Phys Lett*, 1992, 61(16): 1904—1906.
- [6] Feng H, Pang J P, Tada K, *et al.* Large Field-Induced Refractive Index Change without Red Shift of Absorption Edge in Five-Step Asymmetric Coupled Quantum Wells with Modified Potential[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1997, 9: 639—641.

Quantum-confined Stark effect and its application in optical switches

XU Zhi-xin^{1,2}, WANG Ming-hua², JIANG Xiao-qing², ZHOU Qiang², YANG Ai-ling²

(1. Dept. of Science, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China;

2. Semiconductor opto-electronic lab of Zhejiang university, Hangzhou 310027, China)

Abstract: This paper introduces the principal content of quantum-confined Stark effect (QCSE), gives fast 2×2 Mach-Zehnder optical space switches based QCSE. By analysing the performance of the switches, it also points out the shortcoming of optical switches by using rectangular quantum well structures, and finally provides a solution with FACQW'S.

Key words: QCSE; optical switches; absorption loss; quantum well