

准对称耦合量子阱与光开关结构优化设计

徐枝新^{1,2}, 王建中¹, 沙娜¹

(1. 浙江科技学院理学院, 浙江杭州 310023; 2. 浙江大学信息科学与工程学院, 浙江杭州 310027)

摘要: 根据光开关对量子阱材料的要求, 提出了具体的量子阱结构优化原则。以准对称耦合量子阱为蓝本, 利用此优化原则, 对其结构进行优化。通过对优化后的准对称耦合量子阱电光特性的分析, 发现该量子阱结构在低工作电压($F=40\text{ kV/cm}$)、低吸收系数($\alpha<100\text{ cm}^{-1}$)的情况下仍有一很大的场致折射率变化(对 TE 模入射光, $(\Delta n)_{\max}=0.0216$; 对 TM 模入射光, $(\Delta n)_{\max}=0.033$), 从而验证了优化程序的正确性。

关键词: 准对称耦合量子阱; 光开关; 优化设计; 电光特性

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1671-8798(2005)03-0175-04

Quasi-symmetric coupled quantum well and optimal design for optical switch structure

XU Zhi-xin^{1,2}, WANG Jian-zhong¹, SHA Na¹

(1. School of Science, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China;
2. College of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Based on the demands of optical switches for quantum well material, the detailed optimization principles for quantum well structure are put forward. Using the optimization principles, the structure of quasi-symmetric coupled quantum-well is optimized. By analyzing the electro-optical properties of the optimized quasi-symmetric coupled quantum well, we find that the quasi-symmetric coupled quantum well can produce a large field-induced refractive index change (for TE mode, $(\Delta n)_{\max}=0.0216$; for TM mode, $(\Delta n)_{\max}=0.033$) in the case of low electric field ($F=40\text{ kV/cm}$) and low absorption loss ($\alpha<100\text{ cm}^{-1}$), this validate our optimal process.

Key words: quasi-symmetric coupled quantum well; optical switch; optimal design; electro-optical properties

在某些集成光器件中, 如超快行波调制器和光开关, 当它们工作于几十吉赫频段时, 不仅要求调制电压低于 1 V, 而且希望有一个大的折射率变化, 这

样可以提高器件的集成度, 减小器件的尺寸^[1]。在相同的外电场作用下, 准对称耦合量子阱在吸收边能产生一个比矩形量子阱^[2]、非对称耦合量子阱更

收稿日期: 2005-04-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60277034)

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专业在读博士, 主要从事量子阱电光特性的计算机模拟和通信波长量子阱光开关结构设计工作。

大的折射率变化^[3],可以降低工作电压,从而达到减小光开关器件的功耗、提高器件稳定性的目的。本文结合光开关的理想工作条件,对准对称耦合量子阱结构进行再优化,从而产生一个在低工作电压、低吸收系数的情况下仍有一很大的场致折射率变化的量子阱结构。

1 光开关的理想工作条件

(1)光开关工作与不工作时相比,材料折射率变化要尽可能大,这样有利于光开关器件的集成。

(2)光开关工作或不工作时,材料的吸收系数都要尽可能小($\alpha < 100 \text{ cm}^{-1}$),这样可以降低损耗,提高器件稳定性。

(3)材料对输入 TE 的模光信号和 TM 模光信号必须同时具有一个尽可能大的场致吸收系数变化。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。至于量子阱材料对光信号的模式依赖性,可以通过对量子阱材料进行拉应力处理^[4,5],产生一个相同的吸收系数变化。

2 准对称耦合量子阱的结构优化

在对准对称耦合量子阱进行结构优化之前,按照光开关对量子阱材料的要求,提出具体的结构优化三原则(以 TE 模入射光为例)。

(1)在零电场情况下,要尽量减小子能级 E_{hh1} 与 E_{cl} 之间相应的波函数交叠积分,但根据求和规则^[6]会增大子能级 E_{hh2} 与 E_{cl} 、子能级 E_{hh1} 与 E_{c2} 之间相应的波函数交叠积分,所以,这是一个折衷的选择。

(2)在外电场作用下,子能级 $E_{hh+} \rightarrow E_{c-}$ 的激子跃迁能量与子能级 $E_{hh-} \rightarrow E_{c-}$ 的激子跃迁能量的差值 ΔE 要尽可能小。

(3)在外电场作用下,子能级 E_{hh+} 与 E_{c-} 、子能级 E_{hh-} 与 E_{c+} 之间相应的波函数交叠积分与零电场时相比变化要大。

图 1 中: $2a = 4 \text{ ML}$ ($1 \text{ ML} = 0.283 \text{ nm}$), $2b = 3 \text{ ML}$, $L' = 21 \text{ ML}$, $L = 18 \text{ ML}$ 。

第一步,给定 $x = 0.32$,调整 y 的值。取 $y = 1, 2, 3, \dots, 17 \text{ ML}$,利用有限元法^[7]求出子能级 E_{c-} , E_{c+} , E_{hh-} , E_{hh+} 随外电场的变化关系,根据文献^[8]分别计算出子能级 E_{c-} , E_{hh+} 对应的电子、空穴组成的激子的束缚能 E_{exb} 和子能级 E_{c+} , E_{hh-} 对应的电子、空穴组成的激子的束缚能 E'_{exb} 随外场的变化规律,然后求出两个激子跃迁能量差 ΔE ($\Delta E = (E_{c-} +$

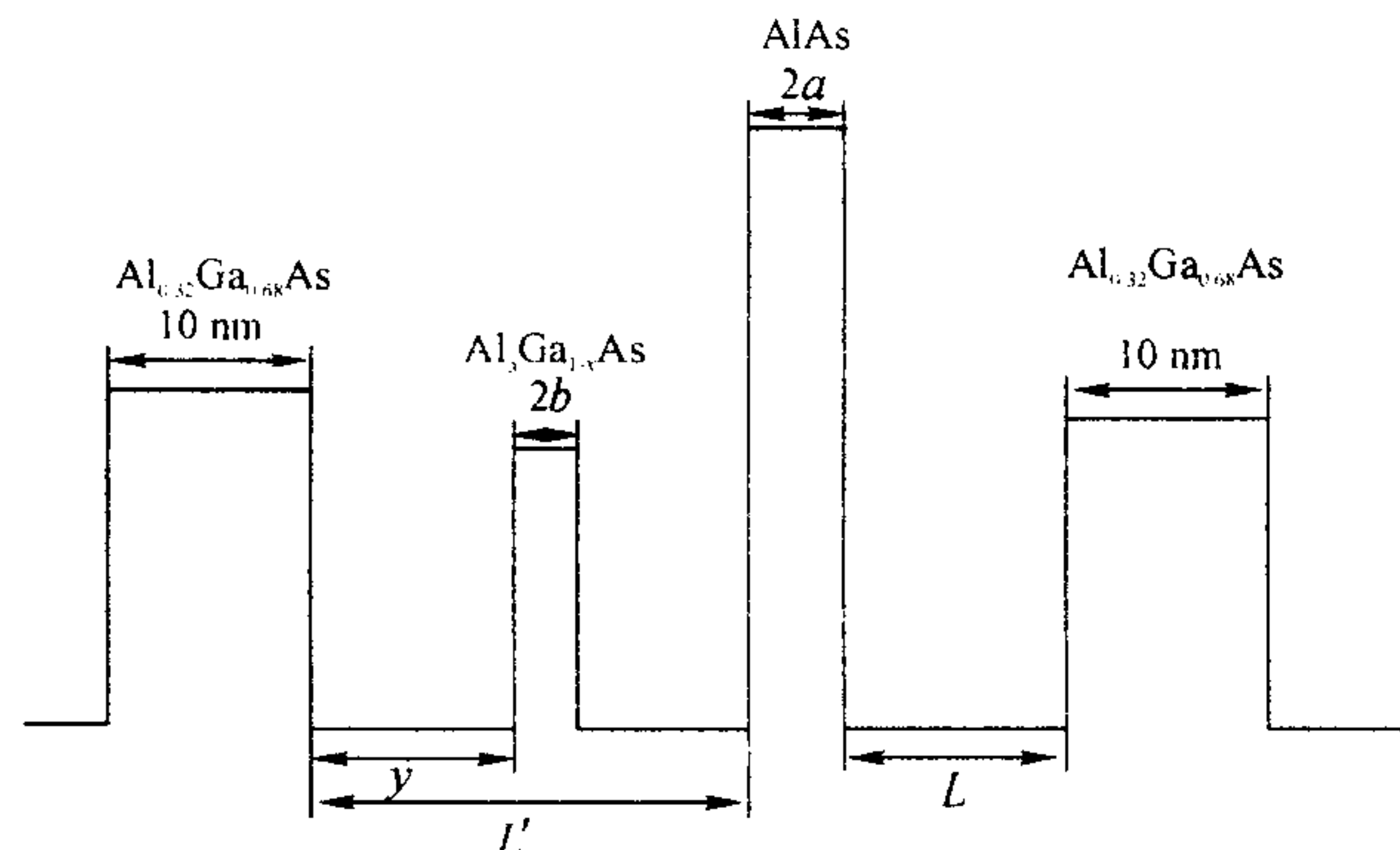


图 1 准对称耦合量子阱势能分布示意图

$E_{hh+} - E_{exb}) - (E_{c+} + E_{hh-} - E'_{exb})$ 随外电场的变化。经过计算发现:当 $y = 14, 15, 16 \text{ ML}$ 时,两个激子跃迁能量差值 ΔE 较小,即两个跃迁很靠近。为方便起见,只画出 $y = 14, 15, 16 \text{ ML}$ 时,两个激子跃迁能量差值 ΔE 随外电场的变化关系,见图 2。

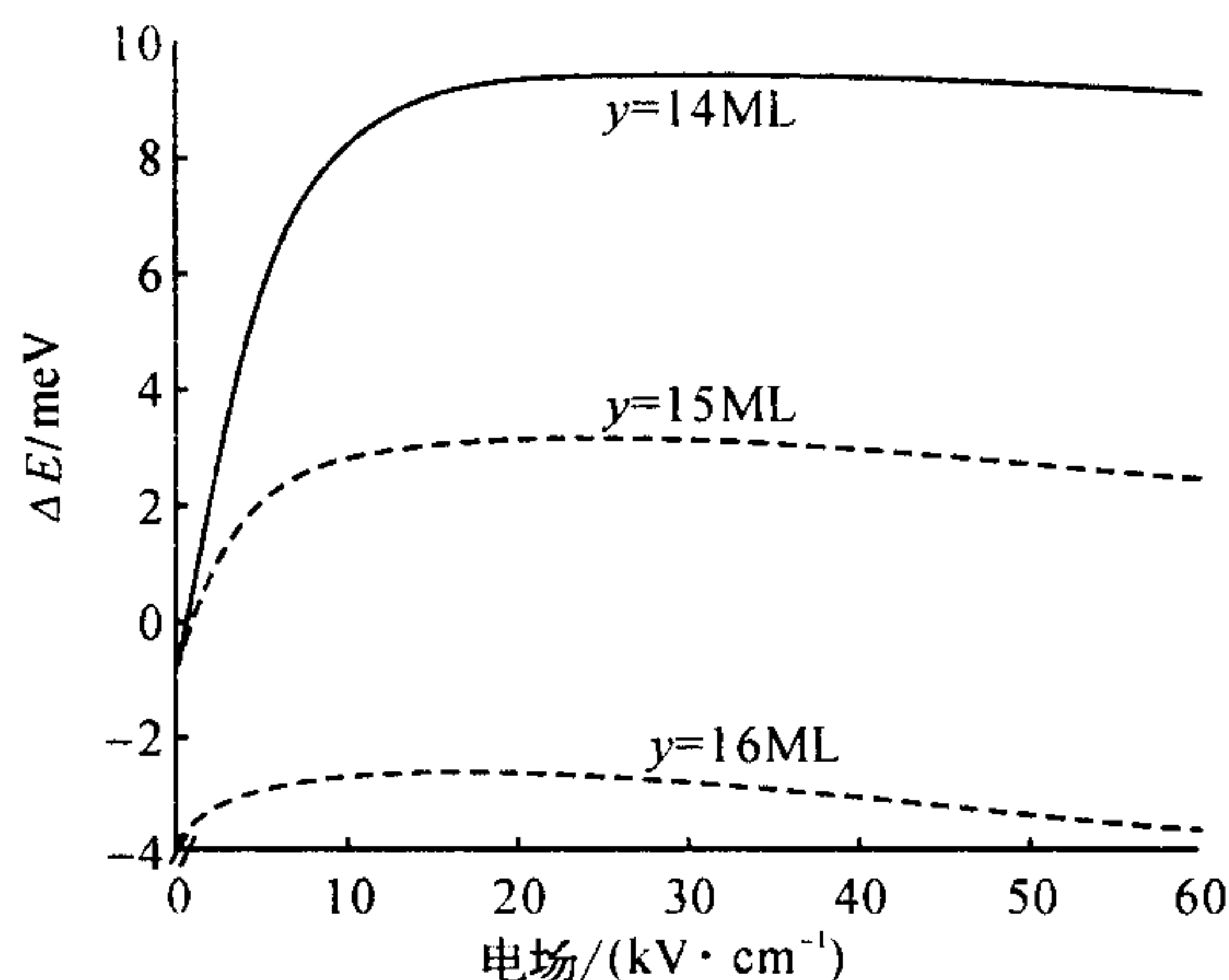


图 2 ΔE 随外电场的变化关系

为了确定 y 的具体数值,利用有限元法^[7]分别给出当 $y = 14, 15, 16 \text{ ML}$ 时,零电场下子能级 E_{hh1} 与 E_{cl} 之间相应的波函数交叠积分,以及在电场作用下子能级 E_{hh+} 与 E_{c-} 、 E_{hh-} 与 E_{c+} 之间相应的波函数交叠积分随外电场的变化规律。经计算:当 $y = 14, 15, 16 \text{ ML}$ 时,零电场下子能级 E_{hh1} 与 E_{cl} 之间相应的波函数交叠积分分别为 0.902、0.745、0.466。子能级 E_{hh+} 与 E_{c-} 相应的波函数交叠积分(用实线表示)、子能级 E_{hh-} 与 E_{c+} 之间相应的波函数交叠积分(用虚线表示)随外电场的变化规律见图 3。综合上述分析, y 值取 15 ML 最为合适。

第二步,在第一步计算结果的基础上,调整左阱中小垒 Al 的含量 x 。从第一步计算结果可以看出,当 $x = 0.32$, $y = 15 \text{ ML}$ 时,两个激子跃迁能量差值 ΔE 已经很小,所以,在这一步左阱中小垒 Al 的含量 x 的

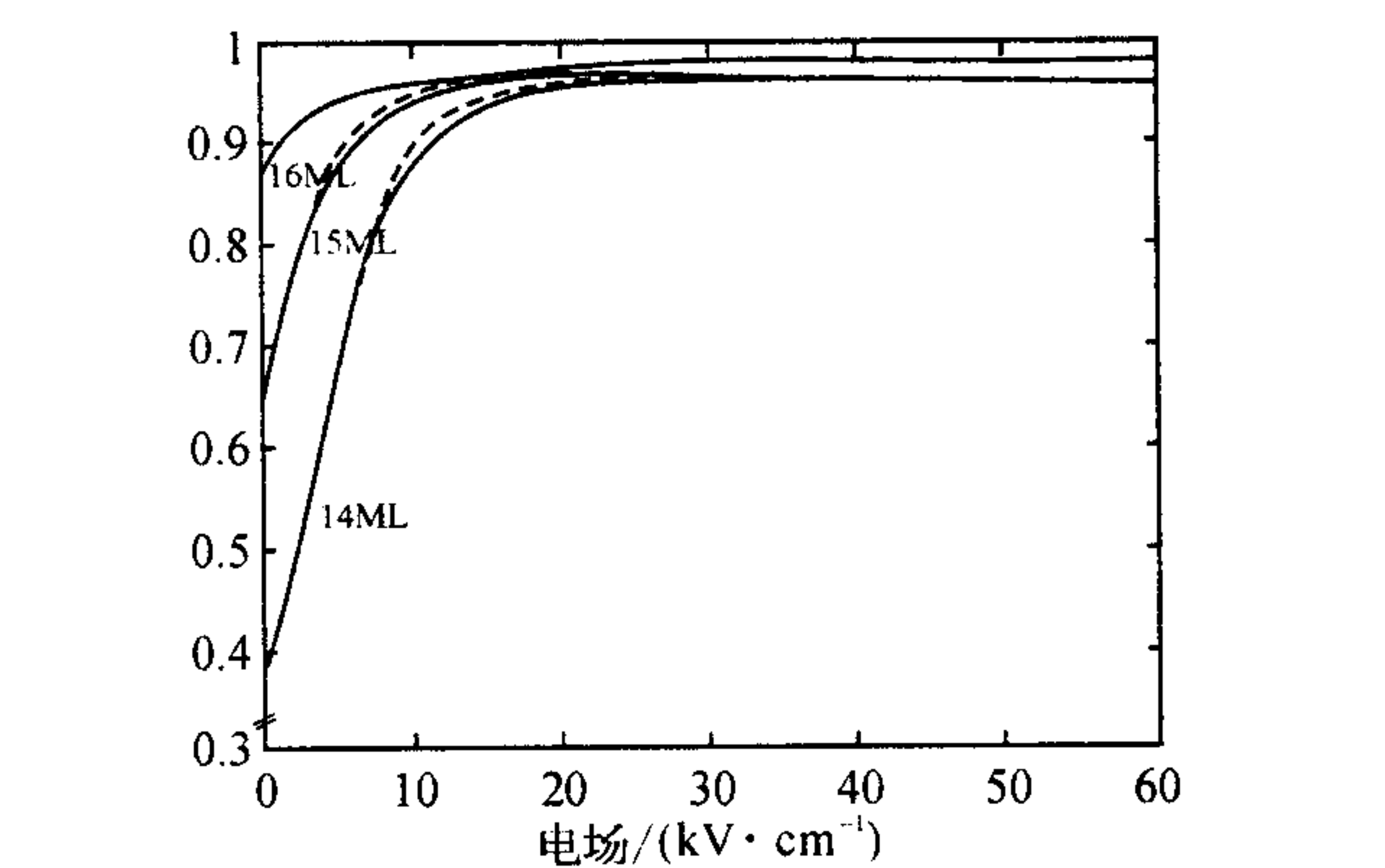


图 3 子能级 E_{hh+} 与 E_{e-} 、子能级 E_{hh-} 与 E_{e+} 之间相应的波函数交叠积分随外电场的变化规律

值只在 $x = 0.32$ 附近作小的调整。取 $x = 0.22, 0.23, 0.24, \dots, 0.39, 0.42$, 采用和第一步相同的办法求出两个激子跃迁能量差值 ΔE 随外电场的变化关系。经过计算发现:当 $x = 0.26, 0.27, 0.28$ 时,两个激子跃迁能量差值 ΔE 很小,即两个跃迁相当靠近。这里也仅画出 $x = 0.26, 0.27, 0.28$ 时两个激子跃迁能量差值 ΔE 随外电场的变化关系曲线,见图 4。

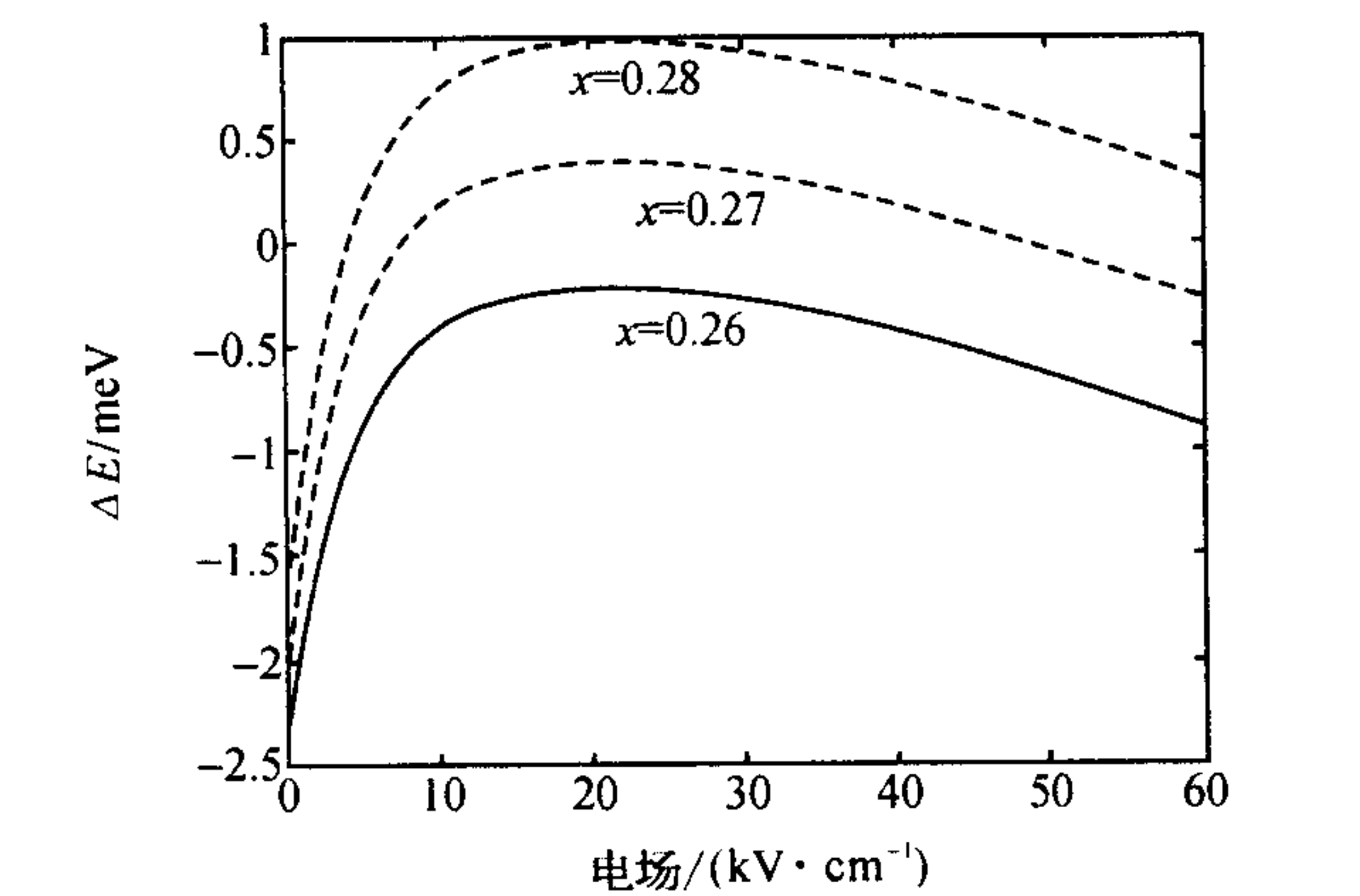


图 4 子能级 $E_{hh+} \rightarrow E_{e-}$ 激子跃迁 $E_{hh-} \rightarrow E_{e+}$ 激子跃迁能量差值 ΔE 随外电市场的变化

同理,为了确定 x 具体的值,也利用有限元法^[7]算出:当 $x = 0.26, 0.27, 0.28$ 时,零电场下子能级 E_{hh1} 与 E_{e1} 之间相应的波函数交叠积分分别为 0.56, 0.59, 0.62,子能级 E_{hh+} 与 E_{e-} 相应的波函数交叠积分(用实线表示)、子能级 E_{hh-} 与 E_{e+} 之间相应的波函数交叠积分(用虚线表示)随外电场的变化规律见图 5。综合考虑,笔者认为 x 取 0.27 较为合适。这样,就得到了一个 $y = 15 \text{ ML}, x = 0.27$ 优化了的准对称耦合量子阱。

3 优化了的准对称耦合量子阱的电光特性

为了验证优化了的准对称耦合量子阱是否满足

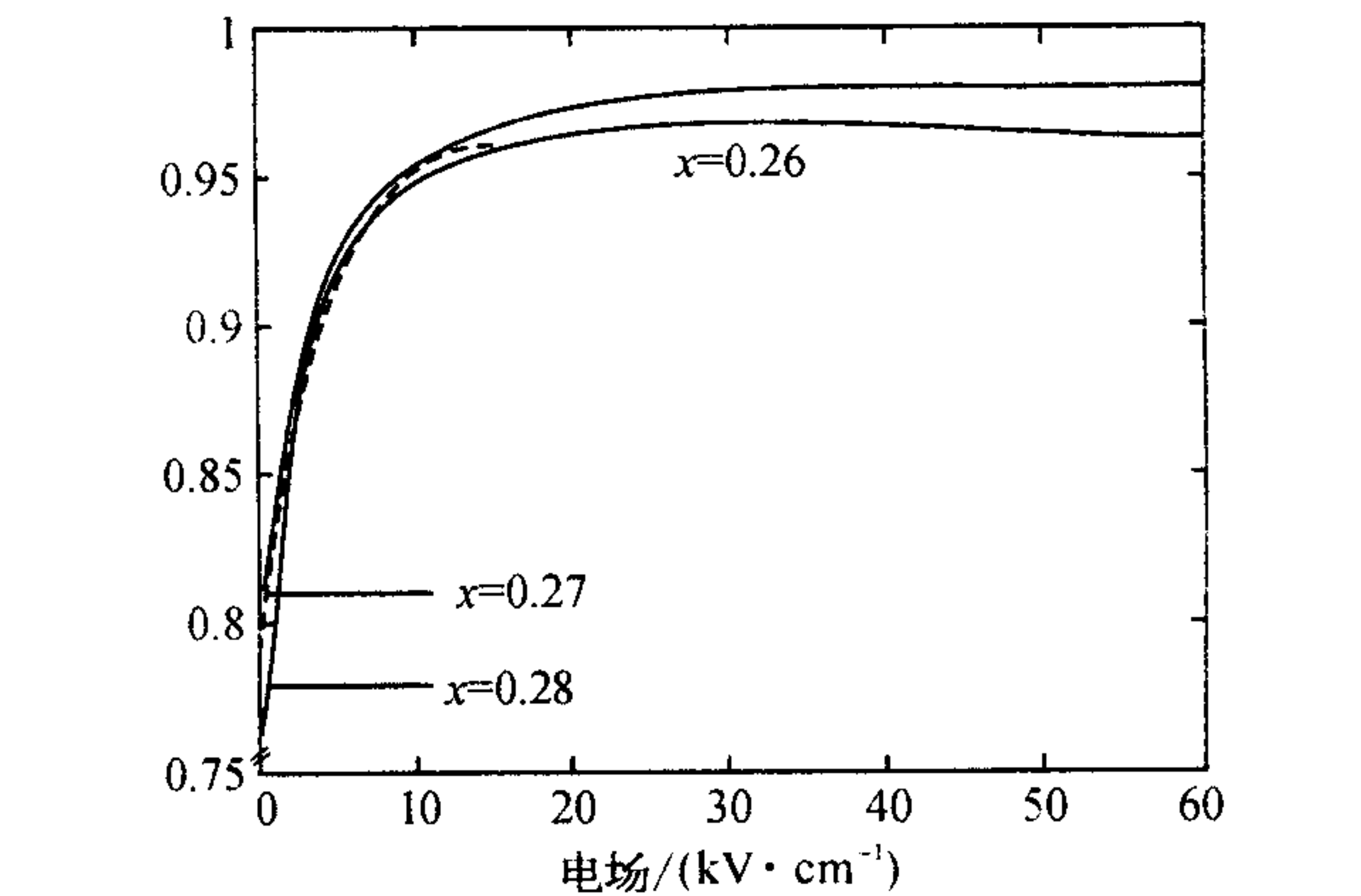


图 5 子能级 E_{hh+} 与 E_{e-} 、子能级 E_{hh-} 与 E_{e+} 之间相应的波函数交叠积分随外电场的变化规律

光开关对量子阱材料的要求,有必要对其电光特性进行研究。首先讨论它的吸收系数变化 $\Delta\alpha$ 随外电场的变化规律。图 6 是采用 Lorentzian 线形函数^[9] 和 HWHM 半经验公式画出的在外电场 $F = 10, 20, 40 \text{ kV/cm}$ 情形下,这种准对称耦合量子阱的吸收系数变化 $\Delta\alpha$ 随外电场的变化曲线。从图 6 可以看到:在外电场作用下,材料对 TE 模入射光和 TM 模入射光同时具有很大的场致吸收系数变化,满足光开关的第三个理想工作条件。

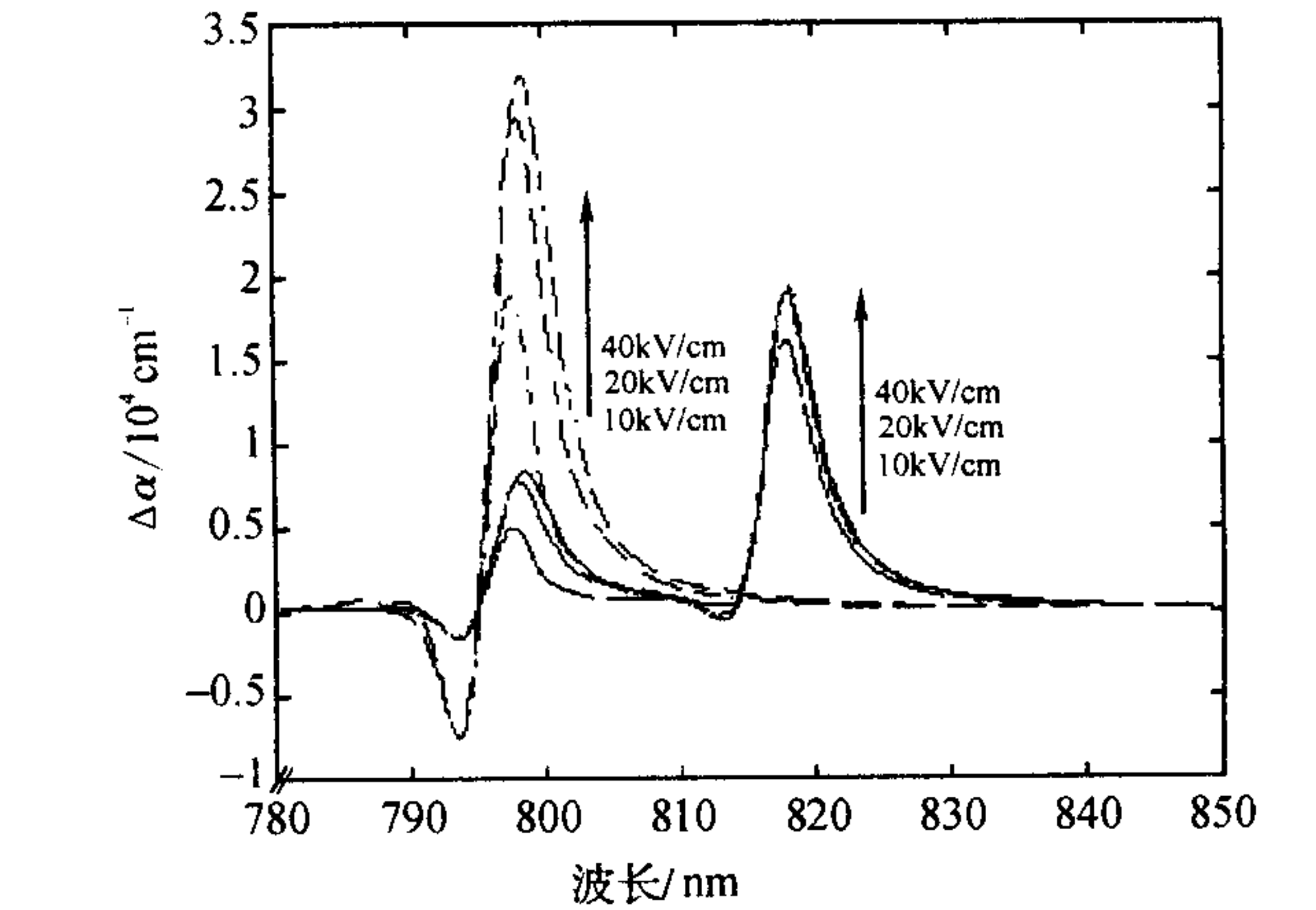


图 6 吸收系数改变谱线随外电场的变化
——TE 模入射光;·····TM 模入射光

接着讨论这种准对称耦合量子阱的折射率改变 Δn 随外电场的变化。图 7 是应用图 6 的结果和 $k-k$ 关系画出的在外电场 $F = 10, 20, 40 \text{ kV/cm}$ 情形下,折射率变化 Δn 随外电场的变化曲线。

从图 7 可以看到:在外电场作用下,材料无论是对 TE 模入射光还是 TM 模入射光都有很大的折射率的变化。进一步的计算表明:在外电场 $F = 40 \text{ kV/cm}$ 时,即使在远离吸收边的条件下($\alpha < 100 \text{ cm}^{-1}$),材料对 TE 模入射光的最大折射率变化

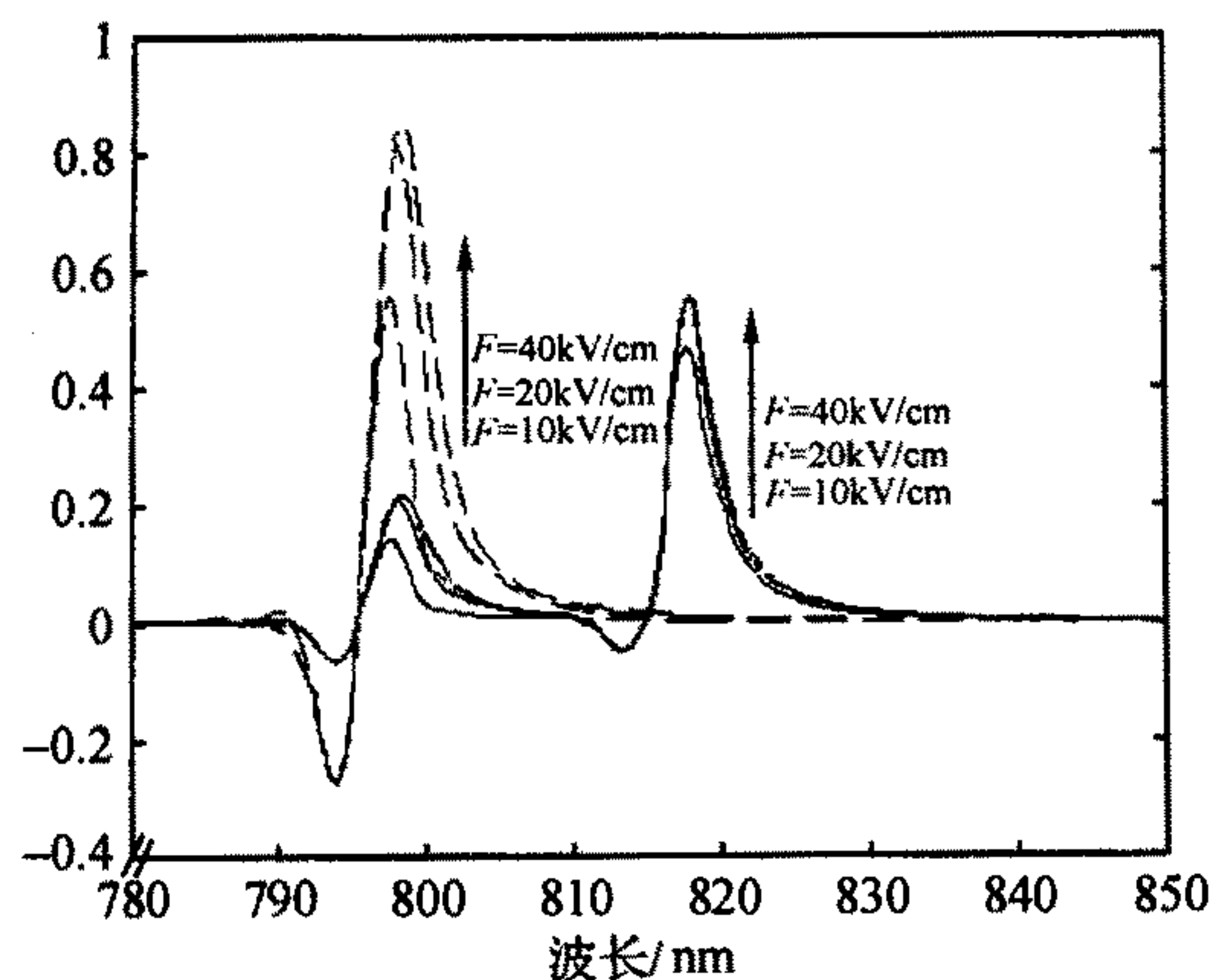


图 7 折射率改变谱线随外加电场的变化
——TE 模入射光;.....TM 模入射光

$(\Delta n)_{\max}$ 可达 0.021 6, 材料对 TM 模入射光的最大折射率变化 $(\Delta n)_{\max}$ 可达 0.033。在相同条件下, 这种准对称耦合量子阱的折射率改变要比通常的矩形量子阱高一个数量级。这就满足了光开关的第一、第二个理想工作条件。

4 小 结

笔者根据光开关的理想工作条件提出了量子阱结构优化的三原则。结合三原则对准对称耦合量子阱进行结构再优化, 得到了一个在低工作电压 ($F = 40 \text{ kV/cm}$)、低吸收系数 ($\alpha < 100 \text{ cm}^{-1}$) 的情形下仍有一个可观折射率变化(对 TE 模入射光, $(\Delta n)_{\max} = 0.021 6$; 对 TM 模入射光, $(\Delta n)_{\max} = 0.033$) 的量子阱光开关结构。

参考文献:

- [1] 徐枝新, 王明华, 江晓清, 等. 量子限制斯塔克效应及其在光开关中的应用[J]. 浙江科技学院学报, 2004, 16(4): 232 — 235.
- [2] 徐枝新, 李明. 对称耦合量子阱能级特性研究与量子阱结构优化[J]. 浙江科技学院学报, 2005, 17(2): 84 — 87.
- [3] Xu Z X, Jiang X Q, Wang Y G, *et al.* A novel coupled quantum well structure with low-driving voltage, low absorption loss and large field-induced refractive index change[J]. Chin Phys Lett, 2005, 22(4): 956 — 959.
- [4] Chong T C, Wan H W, Choa S J. Polarization dependence of field-induced refractive index variation in strained and unstrained quantum well structures [J]. Electronics Letters, 1990, 26(14): 1060 — 1061.
- [5] Moss D J, Ido T, Sano H. Photogenerated carrier sweep-out times in strained $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{In}_y\text{Al}_{1-y}\text{As}$ quantum well modulators [J]. Electronics Letters, 1994, 30: 405 — 406.
- [6] Miller D, Weiner J, Chemla D. Electric-field dependence of linear optical properties in quantum well structures: waveguide electroabsorption and sum rules [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1986, 22(9): 1816 — 1830.
- [7] Nakamura K, Shimizu A, Koshiha M, *et al.* Finite-element analysis of quantum wells of arbitrary semiconductors with arbitrary potential profiles [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1989, 25(5): 889 — 895.
- [8] 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.
- [9] Nakamura K, Shimizu A, Fujii K, *et al.* Numerical analysis of the absorption and the refractive index change in arbitrary semiconductor quantum-well structures [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1992, 28(7): 1670 — 1677.