

双量子阱结构中电子共振隧穿的相干模型*

金世荣 罗晋生

(西安交通大学微电子研究室, 陕西, 西安, 710049)

徐仲英

(中国科学院半导体研究所, 北京, 100083)

摘要 提出了一种新的计算双量子阱结构中电子共振隧穿时间的相干模型, 理论计算与报道的实验结果基本一致. 进一步的讨论表明, 在有电子散射的情况下, 随着势垒厚度的增加, 对比度存在极大值, 而与类 Fabry-Perot 模型的单调增加趋势明显不同.

关键词 共振隧穿, 双量子阱, PL, TRPL.

引言

由于对物理研究的意义及对高速电子和光电器件、量子功能器件的特殊应用潜力, 双势垒或者多势垒结构的共振隧穿现象近年来一直是十分受重视的研究热点^[1~3]. 对于任意一种势场分布, 利用快速计算方法求解单电子的 Schrödinger 方程已经不再是难题了^[4~7], 然而得到的类 Fabry-Perot (F-P) 相干模型的共振隧穿时间往往与实验值相差较大, 其原因是忽略了实际器件中存在的各种散射机制对多电子系统隧穿过程的影响. 此外, 按照类 F-P 模型, 峰谷比随着势垒厚度的增加呈现单调增加的趋势, 这一点与实验事实明显不符, 因而对实际隧穿器件的设计失去指导意义.

本文从单电子的透射率和共振隧穿时间出发, 考虑到电子能级展宽对隧穿过程的影响, 提出了一种新的计算双量子阱结构中光荧光 (PL) 衰减时间以及有效隧穿时间的相干模型, 并将计算值与报道的实验值作了比较, 得到了基本一致的结论. 通过引入共振谷对比度和半宽的概念, 我们讨论了在有电子散射的情况下, 势垒厚度变化对隧穿过程的影响, 并与类 F-P 模型作了比较, 指出了我们的结论在实际隧穿器件设计中的重要性.

1 模型和计算

如图 1 所示, 考虑电子在外电场作用下, 从窄的左阱 (LQW) 通过厚度为 L_B 的中间

* 国家自然科学基金资助项目

本文 1993 年 9 月 13 日收到, 修改稿 1994 年 5 月 19 日收到

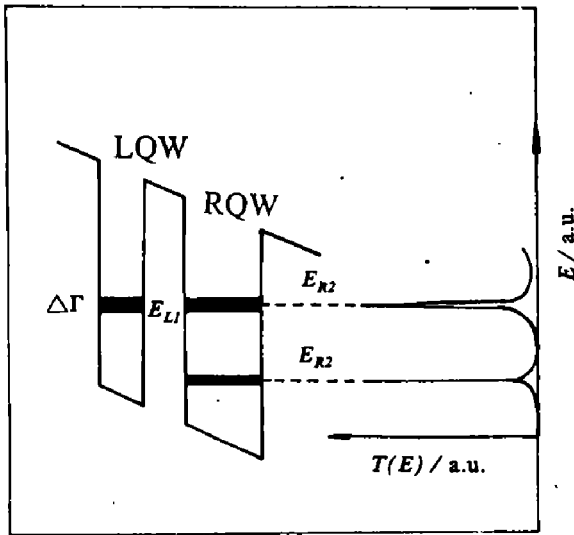


图 1 ADQWs 在近共振偏置电压下的导带子能级, 右边插图为电子透射率 $T(E)$

Fig. 1 Schematic diagram of the conduction band profile and energy subband for ADQWs under an electric field, biased close to the resonance, the transmission probability of the structure is also shown as a function of the electron energy difference $E = E_{L1} - E_{R2}$

势垒向宽的右阱 (RQW) 的隧穿过程, 电子的透射率 $T(E)$ 可以表示为

$$T(E) = \frac{\int_{\text{RQW}} |\Psi_{L1}(x)|^2 dx}{\int_{\text{LQW}} |\Psi_{L1}(x)|^2 dx} \quad (1)$$

式中 Ψ_{L1} 为左阱基态能级 E_{L1} 的包络函数, $E = E_{L1} - E_{R2}$ 为左阱基态 E_{L1} 与右阱第一激发态 E_{R2} 之间的能量差, 它随外加电场的变化而变化. 显而易见, $T(E)$ 还与中间势垒的厚度和高度有关. 假设 τ_{RT}^S 是单个电子的共振隧穿时间, 那么考虑电子透射率后, 隧穿时间可以写为

$$\tau_{RT}(E) = \frac{\tau_{RT}^S}{T(E)} \quad (2)$$

在半导体量子阱结构中, 即使在低温下, 由于界面起伏、杂质、缺陷以及合金无序等因素引起的电子散射, 使得电子能级呈现出与样品有关的非均匀展宽. 如果电子在横向方向

上的不均匀性可以忽略, 那么在能量差为 E 时, 左阱能带 E_{L1} 上的电子隧穿到右阱的平均几率为

$$(\tau_{\text{eff}})^{-1} = \frac{\int_{\Delta\Gamma} D(E)f(E)[\tau_{RT}(E)]^{-1} dE}{\int_{\Delta\Gamma} D(E)f(E) dE} \quad (3)$$

式中 $\Delta\Gamma$ 为左阱能级 E_{L1} 的展宽, $D(E)$ 、 $f(E)$ 分别为能态密度和分布函数, 在二维情况下, $D(E)$ 等于常数. 如果近似地认为电子在有限的展宽能级 $\Delta\Gamma$ 上的分布是均匀的, 那么由式 (2) 和 (3) 可以得到电子的有效隧穿时间为

$$\tau_{\text{eff}} = \frac{\Delta\Gamma}{\int_{\Delta\Gamma} T(E) dE} \times \tau_{RT}^S \quad (4)$$

在时间分辨光谱实验中, 为了避免能带填充效应以及密度效应, 一般采用低密度光激发样品, 在低温情况下, 可以近似地认为左阱的电子主要分布在基态 E_{L1} 上, 因此式 (4) 即代表左阱电子隧穿到右阱的有效隧穿时间. 从式 (4) 中可以看到, 左阱能级的展宽对隧穿时间有直接的影响. 当左阱电子隧穿到右阱后, 由于子带间的散射, 将很快地从共振耦合态

向基态 E_{R1} 弛豫. 这种过程一般是不可逆的, 因此右阱的能级展宽, 由于不影响电子透射率从而不影响有效隧穿时间, 其效果仅仅是将隧穿范围拓宽了.

在时间分辨光谱测量中, 左阱的荧光衰减几率 ($1/\tau_{PL}$) 一般地可以表示为阱间隧穿几率 ($1/\tau_{eff}$) 和辐射-非辐射复合几率 ($1/\tau_{RS}$) 之和, 即

$$\frac{1}{\tau_{PL}} = \frac{1}{\tau_{eff}} + \frac{1}{\tau_{RS}} \quad (5)$$

式中 $1/\tau_{RS} = 1/\tau_R + 1/\tau_{NR}$ 代表左阱中的辐射复合几率 ($1/\tau_R$) 和非辐射复合几率 ($1/\tau_{NR}$) 之和, 它与样品质量有关.

共振时, 单电子的隧穿时间 τ_{RT}^S 由相干隧穿时间 τ_{coh} 和从共振耦合态弛豫到基态 E_{R1} 的散射时间这两者中较长的一个决定. 当势垒较薄时, 它由子带间散射时间决定, 从而与 L_B 无关, 其最大预期值为 2 ps^[8]. 对于较厚的势垒, τ_{RT}^S 则由相干隧穿时间 τ_{coh} 决定, 可以由测不准关系 $\tau_{coh} = \frac{\pi\hbar}{\Delta E}$ 来估算, 其中 ΔE 为共振耦合态能级分裂值, 随 L_B 的增大而呈指数增加.

我们用上述模型对两组 GaAs/ $Al_xGa_{1-x}As$ 非对称双量子阱样品进行了数值计算, 两组共 4 个样品的结构参数和计算中所采用的参数及共振点结果由表 1 给出, 其中标星号的参数分别为文献 [8, 9] 中的测量值. 理论计算值与实验值的比较分别在图 2 和 3 中给出.

图 4 和 5 分别给出了第一组中 $L_B = 6.0$ 和 8.0 nm 的两个样品的透射率和有效隧穿时间. 从图 2 和 3 可以看到, 理论与实验在大多数情况下符合较好, 证明了这个模型的有效性. 此外, 从理论值与实验值在共振条件下的一致性并且明显大于单电子相干隧穿时间和子带

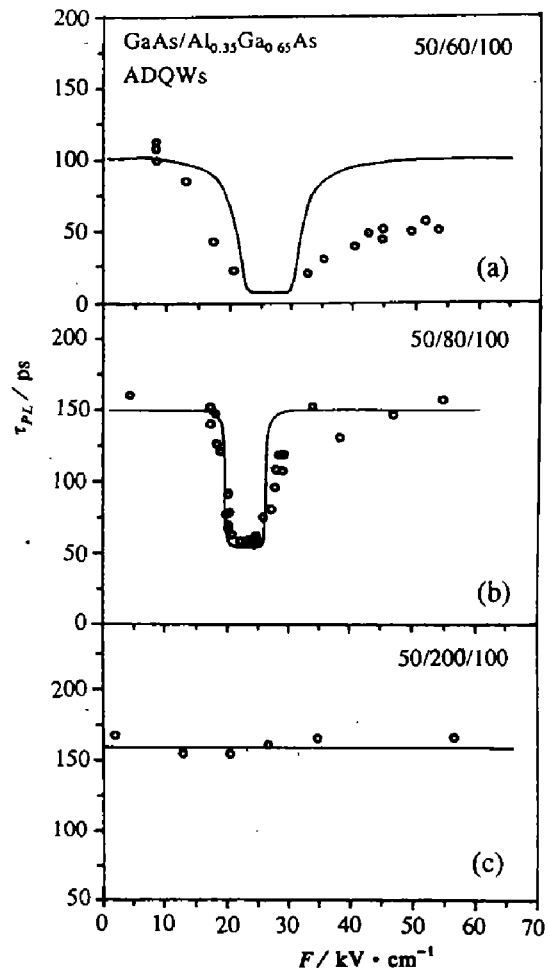


图 2 理论计算值 (实线) 与试验值 (文献 [8]) 的比较

Fig. 2 Comparison between the calculated exciton decay time τ_{PL} (solid line) and the measured values (from Ref. [8])

表 1 两组 GaAs/ $Al_xGa_{1-x}As$ ADQWs 样品的结构参数和计算参数及结果
Table 1 The structural and calculative parameters and results for two groups of GaAs/ $Al_xGa_{1-x}As$ ADQWs samples

	Al 组分 x	LQW (nm)	RQW (nm)	L_B (nm)	$\Delta\Gamma^*$ (meV)	τ_{RS}^* (ps)	τ_{RT}^S (ps)	τ_{PL} (ps)	
								计算值	测量值
第一组	0.35	5	10	6	5	100	2	5.6	< 7.5
				8	5	150	5.6	53	56
				20	5	160	≥ 1.6 ns	160	160
第二组	0.3	7	10	5.5	4.3	75	2	3.3	7.5

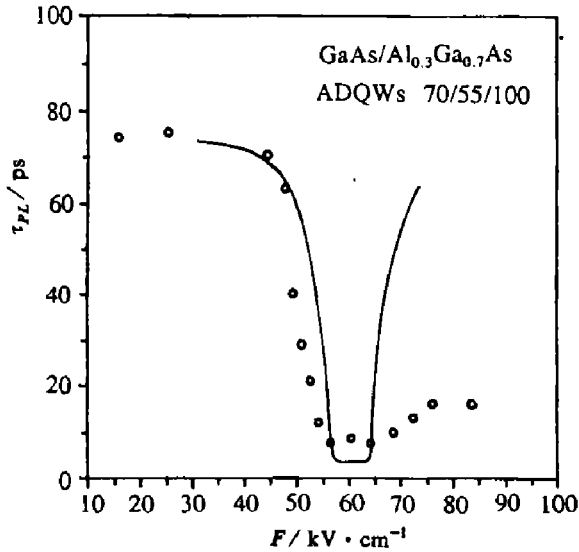


图3 理论计算值(实线)与实验值(文献[9])的比较

Fig. 3 Comparison between the calculated exciton decay time τ_{PL} (solid line) and the measured values (from Ref. [9])

间散射时间这个事实,说明了由各种散射过程引起的电子能级展宽确实是影响电子共振隧穿时间的主要原因.然而,我们也注意到了在势垒厚度较薄的情况下出现的两种偏差:其一是在共振条件下,理论计算值小于实验值;其二是在薄势垒高电场情况下,理论计算的非共振隧穿时间明显大于实验值.出现第一种偏差的原因是在薄势垒情况下,阱间相干隧穿时间与子带间散射时间相当,前者甚至可能小于后者,这时不能单纯地用两者中的慢过程的时间作为单电子共振隧穿时间,而必须把这两种过程作为一个整体来考虑.实际上,如果阱间相干隧穿时间小于子带间弛豫时间,那么隧穿到右阱的一部分电子有可能再返回到左阱中来,这样,还须计入右阱电子的透射率及能级展宽对电子隧穿时间的影响,而其综合效果是使电子有效隧穿时间变长.出现第二种偏离的原因,一是电场的增加使得倾斜的势垒有效厚度变小,导致非共振隧穿时间的减小^[10],根据 Tada 等人的测量结果^[11],对于势垒为 30 Å 的结构,非共振隧穿时间将减小到 50 ps;二是高电场薄势垒情况下诱导的杂质、缺陷或者表面态等散射辅助隧穿机制的增强效应.此外,值得指出的是,由于 MBE 生长技术和测量技术的误差,使得在薄势垒情况下,理论计算与实验值比较困难.所有这些尚有待理论和实验上的进一步探索.

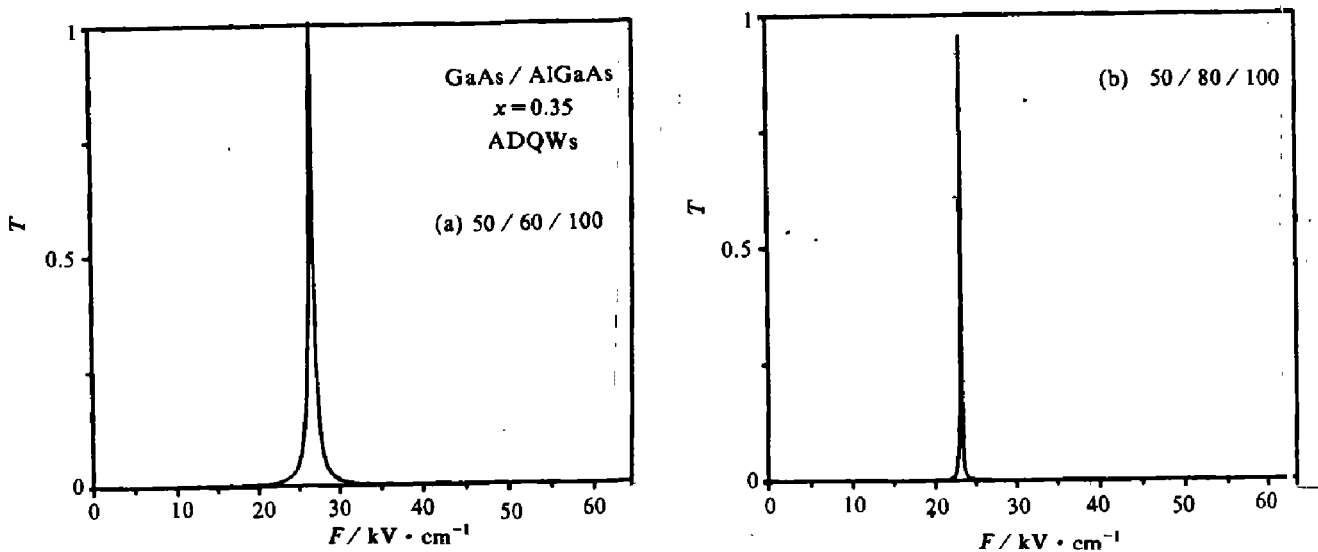


图4 理论计算的电子透射率

Fig. 4 Calculated transmission probability $T(E)$ of electrons

间散射时间这个事实,说明了由各种散射过程引起的电子能级展宽确实是影响电子共振隧穿时间的主要原因.然而,我们也注意到了在势垒厚度较薄的情况下出现的两种偏差:其一是在共振条件下,理论计算值小于实验值;其二是在薄势垒高电场情况下,理论计算的非共振隧穿时间明显大于实验值.出现第一种偏差的原因是在薄势垒情况下,阱间相干隧穿时间与子带间散射时间相当,前者甚至可能小于后者,这时不能单纯地用两者中的慢过程的时间作为单电子共振隧穿时间,而必须把这两种过程作为一个整体来考虑.实际上,如果阱间相干隧穿时间小于子带间弛豫时间,那么隧穿到右阱的一部分电子有可能再返回到左阱中来,这样,还须计入右阱电子的透射率及能级展宽对电子隧穿时间的影响,而其综合效果是使电子有效隧穿时间变长.出现第二种偏离的原因,一是电场的增加使得倾斜的势垒有效厚度变小,导致非共振隧穿时间的减小^[10],根据 Tada 等人的测量结果^[11],对于势垒为 30 Å 的结构,非共振隧穿时间将减小到 50 ps;二是高电场薄势垒情况下诱导的杂质、缺陷或者表面态等散射辅助隧穿机制的增强效应.此外,值得指出的是,由于 MBE 生长技术和测量技术的误差,使得在薄势垒情况下,理论计算与实验值比较困难.所有这些尚有待理论和实验上的进一步探索.

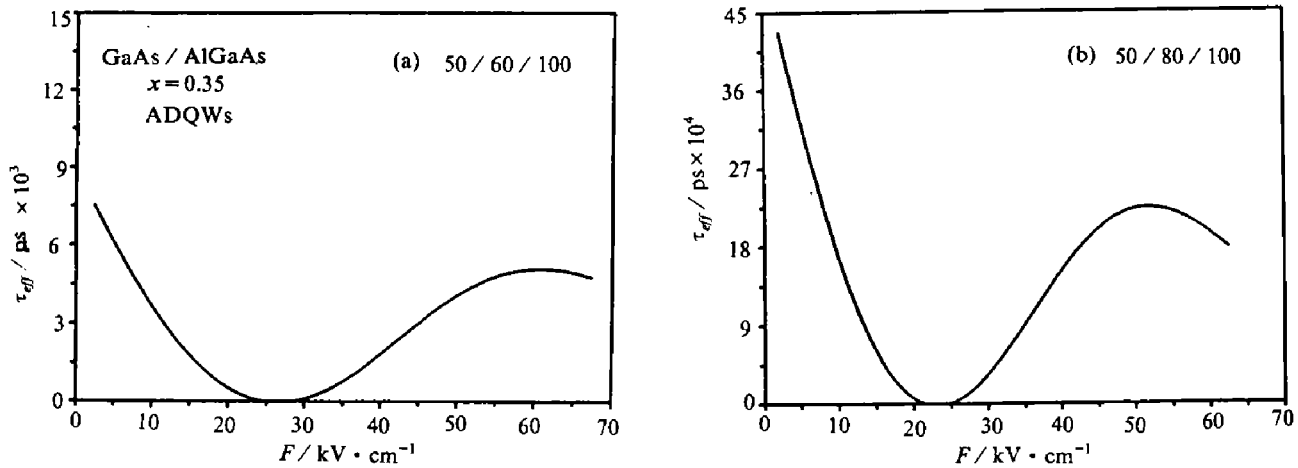


图 5 理论计算的有效隧穿时间

Fig. 5 Calculated effective tunneling time τ_{eff} of electrons

2 讨论

在图 2 和 3 中，我们可以清楚地看到理论所预期的共振谷和共振平台。Oberli 等人曾观察到这种平台^[9]，其测量值是 0.3 V，用这个模型计算的共振平台为 0.34 V，与实验值符合得较好。共振平台的出现恰恰是电子能级展宽所致。一方面，当电子受到各种散射作用后，能级不再是 δ 型的，而是展宽为一定的宽度。另一方面，实验结果的分析表明，电子的隧穿“通道”（相当于透射率或者共振态最小能级分裂值 ΔE ）仍由势垒形状决定，而与电子能级展宽无关。因此在共振状态附近总存在某个电场范围，当电场处在这个范围内

时，在某一时刻从左阱隧穿到右阱的那部分电子数目基本上相等，电子的共振隧穿时间在这个范围内基本上保持不变。此外，在势垒比较薄的情况下，透射峰很宽，甚至大于电子能级展宽，在共振时左阱中的所有电子在同一时刻几乎都能以单电子共振隧穿速率隧穿到右阱中去，因此其有效共振隧穿时间接近于单电子的共振隧穿时间。

为了研究在有电子散射情况下势垒厚度对隧穿过程的影响，我们定义共振谷对比度为

$$\Lambda = \frac{\tau_{PL}^{NRT} - \tau_{PL}^{RT}}{\tau_{RS}} \quad (6)$$

式中 τ_{PL}^{NRT} 和 τ_{PL}^{RT} 分别为平带附近及共振条件下的荧光衰减时间。我们在图 6 中给出了理论计算的对比度 Λ 随势垒厚度 L_B 的变化关系。发现在激子线宽有一定宽度

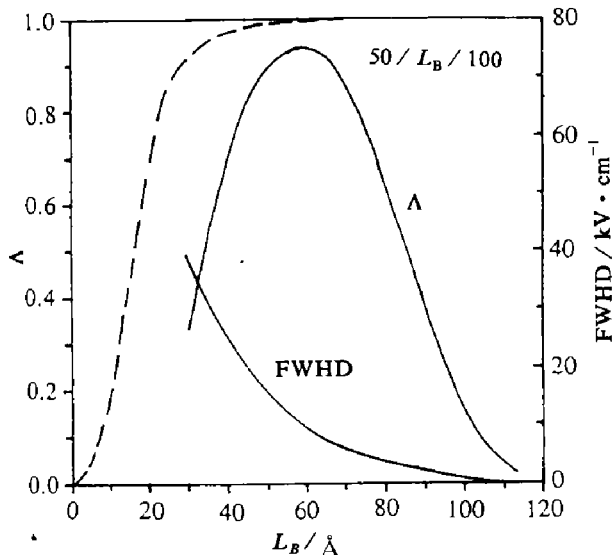


图 6 理论计算的对比度 Λ 和 FWHD 随势垒厚度 L_B 的变化，图中虚线为类 FP 相干模型的结果 ($\Delta\Gamma=5$ meV, $\tau_{RS}=150$ ps)

Fig. 6 Calculated contrast Λ and FWHD versus barrier thickness L_B

的情况下, 当 L_B 增加时, A 开始呈上升趋势, 达到一最大值后, 随着 L_B 的进一步增加反而减小, 这与类 F-P 模型的单调增加趋势 (图中虚线所示) 明显不同, 实际上这种差别正是由于电子散射作用造成的. 图 6 还给出了共振谷宽度 (FWHD) 随势垒厚度的增加而单调下降的关系.

假设样品未掺杂区的实际厚度为 d_{und} , 那么共振谷宽度 FWHD 与 d_{und} 的乘积正好给出了该样品所能观察到共振隧穿现象的电压范围. 由于 FWHD 随着 L_B 的单调下降关系, 因此在势垒较厚的情况下, 还必须考虑电压起伏和不均匀性对共振隧穿造成的影响.

在实际器件的设计中, 往往希望有较高的对比度. 仅仅从对比度看, 由图 6 可知 A 的极大值位置对应势垒厚度的最佳值, 但是由于观察共振隧穿过程需要一定的电压范围, 因此在这两者之间权衡是必要的.

3 小结

考虑到量子阱中电子散射对能级的展宽效应, 我们提出了一种计算双量子阱中电子共振隧穿时间的相干模型. 理论与实验的一致性表明, 当计入电子能级的展宽后, 共振隧穿过程仍可以用简单的相干模型来解释. 有关共振谷对比度和共振谷宽度的讨论比较真实地反映了在有电子散射的情况下, 势垒厚度对隧穿过程的影响, 对实际隧穿器件的设计有着指导作用.

致谢 作者之一金世荣感谢中科院半导体研究所夏建白研究员和郑厚植研究员所给予的有益讨论, 还要感谢封松林博士提供的部分程序.

参考文献

- 1 Ricco B, Azbel M Ya. *Phys. Rev.*, 1984,**B29**:1970
- 2 Price P J. *Phys. Rev.*, 1988,**B38**:1994
- 3 Sakaki H, Matsusue T, Tsuchiya M. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989,**25**:2498
- 4 Bahder T B, Morrison C A, Bruno J D. *Appl. Phys. Lett.*, 1987,**51**:1089
- 5 Ghatak A K, Goyal I C, Gallawa R L. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990,**26**:305
- 6 Nakamura K, Shimizu A, Koshiha M, et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991,**27**:1189
- 7 Inaba H, Kurosawa K, Okuda M. *IEICE transactions*, 1991,**E74**:1310
- 8 Nido M, Alexander M G W, Rühle W W, et al. *SPIE*, 1990,**1268**:177
- 9 Oberli D Y, Shah J, Damen T C, et al. *Phys. Rev.*, 1989,**B40**:3028
- 10 Norris T B, Song X J, Schaff W J, et al. *Appl. Phys. Lett.*, 1989,**54**:60
- 11 Tada T, Yamaguchi A, Ninomiya T, et al. *J. Appl. Phys.*, 1988,**63**:549

COHERENT MODEL FOR RESONANT TUNNELING OF ELECTRONS IN DOUBLE QUANTUM WELLS*

Jin Shirong Luo Jinsheng

(Institute of Microelectronics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shannxi 710049, China)

Xu Zhongying

(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract A new coherent model for calculating the resonant tunneling of electrons in double quantum wells is presented. The validity of the model is confirmed by the experiments reported elsewhere. The discussion in this paper shows that the contrast A of the RT valley is in striking contrast to the Fabry-Perot analogy where a monotonous decrease of A is usually predicted.

Key words resonant tunneling, double quantum wells, PL, TRPL.

*The project supported by the National Natural Science Foundation of China.