

文章编号:1007-2985(2011)03-0044-04

太赫兹场作用下的 GaAs 双量子阱的光吸收分析*

石长柏, 彭金璋

(吉首大学物理科学与信息工程学院, 湖南 吉首 416000)

摘要:用密度矩阵理论分析了在超快脉冲及太赫兹场作用下 GaAs 量子阱和双量子阱的光吸收谱. 分析表明:在直流和太赫兹场作用下,由于量子约束斯塔克效应,光吸收谱呈现出多个激子吸收峰. 改变太赫兹的强度和频率,吸收谱出现恶歇分裂,并产生边带. 这些分裂主要来源于太赫兹作用下激子的非线性效应.

关键词:光吸收谱;量子阱;太赫兹

中图分类号:O471.3, O472+.3, TN219

文献标志码:A

现代光通信器件,如光开关、调制器及波分复用器,要求对高频辐射下的半导体的光吸收有一个透彻的了解. 最近,强太赫兹(THz)场作用下量子阱的带边吸收谱,引起了人们广泛兴趣^[1-3]. 当量子阱受到强太赫兹及超快脉冲辐照时,表现出许多有趣的非线性效应,如交流斯塔克效应、弗伦兹-凯尔迪什效应等. 对于这些现象,目前已有许多理论进行了研究^[4-6], 研究结果表明,量子阱在外电场作用下,表现出量子约束斯塔克效应,从而导致带边吸收峰出现红移,并产生边带.

笔者主要研究直流及太赫兹场作用下的 GaAs 量子阱的光吸收谱. 首先计算了只有直流偏压下的光吸收谱,再计算了在直流偏压下,THz 强度变化对光吸收谱的影响. 计算结果表明:无论是直流还是 THz 场,都使吸收谱出现约束斯塔克效应;当量子阱受到 THz 场作用时,带隙边激子峰出现恶歇分裂.

1 太赫兹场作用下的运动学方程

笔者用密度矩阵理论来研究太赫兹场及超快脉冲作用下 GaAs 量子阱的光吸收谱. THz 场的极化方向为量子阱的生长方向,如图 1 所示. 量子阱的总哈密顿量主要由 4 部分组成^[7]: $H_{\text{total}} = H_0 + H_T + H_I + H_C$, H_0 为未考虑库仑势和外场作用时的哈密顿量, H_T , H_I 及 H_C 分别为量子阱与太赫兹作用,量子阱与超快脉冲作用及库仑势的哈密顿量. 由哈密顿量,得到量子阱的海森堡运动方程为

$$\hbar \frac{d p_k^{ml}(t)}{dt} = -i(\epsilon_{ek}^l + \epsilon_{hk}^m - \hbar\omega_g) p_k^{ml}(t) + i(n_{ek}(t) + n_{hk}(t) - 1)\omega_{R,k}(t) + iE(t) \sum_n (\mu^{lm} p_k^{nm} - \mu^{mn} p_k^{nl}) - \Gamma_s p_k^{ml}. \quad (1)$$

其中: $\hbar\omega_{R,k}(t) = d_{cv} E_{\text{opt}}(t) \delta_{ln} + \sum_{p,s,q} V_{ls}^{mp}(k-q) p_q^{ps}$; $n_{e(h),k}$ 为电子(空穴)分布函数. 在本文中满足费米-狄拉克分布^[8]. 解运动方程得到量子阱的带间极化值 $p(t)$, 由麦克斯韦波动方程,量子阱的光吸收谱可以通过带间极化值求出^[1]:

$$\chi(\omega) = \frac{4\pi\omega_k}{c\sqrt{\epsilon_b}} \frac{\text{Im}[P(\omega)E(\omega)^*]}{|E(\omega)|^2}, \quad (2)$$

其中 $P(\omega)$ 和 $E(\omega)$ 分别为带间极化值及超快脉冲包络函数的傅立叶变化.

* 收稿日期:2011-04-11

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(10JJ6068)

作者简介:石长柏(1972-),男(苗族),湖南吉首人,吉首大学物理科学与信息工程学院硕士生,主要从事功能材料研究

通讯作者:彭金璋(1963-),男,湖南桑植人,吉首大学物理科学与信息工程学院教授,硕士生导师,主要从事铝铜合金材料研究.

2 太赫兹场作用下的吸收谱

为简便起见,量子阱为无限 GaAs 势阱,计算时考虑 2 个导带 3 个价带.图 1 为量子阱在无偏压及在不同直流偏压下的光吸收谱,其中最低的一条实线为无偏压且不考虑库仑势时的光吸收谱,阶梯状实线为无偏压下自由载流子的光吸收谱.从图 1 中可以看出其光吸收谱主要呈现出 2 个台阶,其位置分别对应 e_1-h_1 和 e_2-h_2 跃迁.当考虑库仑势时,光吸收谱主要表现为激子峰,偏压 $F_{dc} = 0, 20$ 及 30 kV/cm 时的光吸收谱如图 1 示.当偏压为 0 时,其光吸收谱主要为 2 个激子峰,其位置分别与 e_1-h_1 和 e_2-h_2 跃迁相对应.当偏压增加到 20 kV/cm 时,光吸收谱除了出现 e_1-h_1 和 e_2-h_2 激子峰外,还出现几个小激子峰,他们分别对应 $e_1-h_2, e_1-h_3, e_2-h_1$ 及 e_2-h_3 跃迁.另外,从图 1 还可以看出 e_1-h_1 激子峰位置相对于零偏压时的激子峰明显左移,出现红移,且强度减小.进一步增加直流偏压到 40 kV/cm,红移更为明显,激子峰强度进一步减小,这主要为量子约束斯塔克效应所致,但 e_2-h_2 激子峰却出现蓝移.

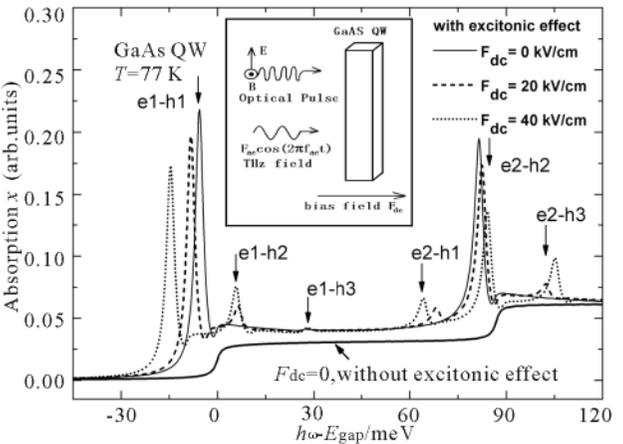
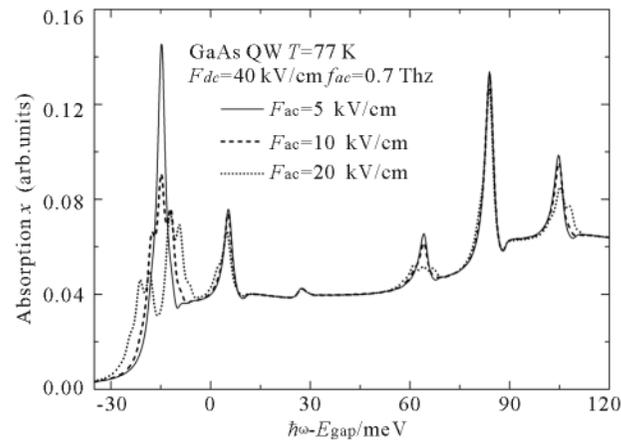


图 1 包括激子效应时,不同直流偏压下的量子阱光吸收谱



直流电场强度为 $F_{dc} = 40$ kV/cm. 太赫兹频率为 $f_{ac} = 0.7$ THz, 强度分别为 $F_{ac} = 5, 10, 20$ kV/cm

图 2 太赫兹场及直流偏压下量子阱的光吸收谱

图 2 为量子阱同时受到直流偏压及太赫兹场作用下的光吸收谱.其中直流偏压值为 $F_{dc} = 40$ kV/cm, THz 场的频率为 $f_{ac} = 0.7$ THz, 3 条光吸收谱线分别对应的 THz 场强度为 $F_{ac} = 5, 10, 20$ kV/cm. 从图 2 中可以看出,当 THz 场的强度为 5 kV/cm 时,带隙边的激子峰只有 1 个峰,这个峰对应 e_1-h_1 跃迁;当 THz 强度增加到 10 kV/cm 时,带隙边的激子峰分裂成 2 个峰.这个俄歇分裂主要源于激子的非线性动力特性,并导致边带出现^[2];当 THz 场较弱时,分裂较小,分开的 2 个峰连成一个较宽的峰;当 THz 场进一步增加到 20 kV/cm 时,分裂更为明显.这些与实验结果相一致^[3].从图 2 中还发现, THz 场强度的变化对 e_2-h_2 跃迁影响较小.主要原因是 e_2-h_2 跃迁能量远大于 f_{ac} 值,因此不会与 THz 共振.

比较图 1, 2 可以发现:无论是直流还是 THz 场,都能产生量子约束斯塔克效应,一方面使带隙边激子峰产生红移,另一方面使随着外场增加,带隙边激子峰强度减小.但是量子阱在 THz 场作用下,其带隙边激子峰产生分裂,这是直流

场作用时所没有的效应,主要是由于 THz 与激子相互作用产生的非线性效应产生的.因此研究量子阱在 THz 场作用下的吸收谱具有更现实的意义.

图 3 为非对称双量子阱包括(cc) 和 不包括(nc) 库仑作用的光吸收谱,太赫兹场的强度为 8.5 kV/cm, 频率从 0 变到 5.5 THz. 为便于对比,没有太赫兹场的非对称双量子阱的吸收系数也显示出来(顶部栏),吸收谱中只出现时 e_1-h_1 和 e_2-h_2 激子峰. 对非对称双量子阱施加太赫兹场, e_1-h_1 激子峰左边出现 2 个复制峰, e_2-h_2 激子峰右边也出现 2 个复制峰. 随着太赫兹场强度增大,包括(cc) 和 不包括(nc) 库仑作用的光吸收谱中,低能复制峰出现红移,强度不断减小;高能复制峰出现蓝移,强度也不断减小. 对比包括(cc) 和 不包括(nc) 库仑作用的光吸收谱,可以看出包括库仑作用的 e_1-h_1 以及 2 个低能复制峰的强度要比同频率不包括库仑作用时大得多.

图 4 为非对称双量子阱包括(cc) 和 不包括(nc) 库仑作用的光吸收谱,太赫兹场的强度分别为 12.75 kV/cm 和 4.25 kV/cm, 频率为 1 THz. 当 $F_{ac} = 4.25$ kV/cm, 不包括库仑作用时, e_1-h_1 与其他几个激子峰合成一个宽峰, e_1-h_1 左边出现 2 个复制峰;考虑库仑作用时, e_1-h_1 与其他几个激子峰与其他几个激子峰分离开. 当 $F_{ac} = 12.75$ kV/cm, 不包括库仑作用时, e_1-h_1 激子峰分裂成强度相当的 2 个峰, e_1-h_1 左边也出现 2 个复制峰;考虑库仑作用时, e_1-h_1 激子吸收双峰中跃迁能量较大的峰在强度上显著增大,而跃迁能量较小的峰在强度上明显减小,此时在包括和 不包括库仑作用的光吸收谱中, e_2-h_2 激子峰右边出现 4 个复制峰.

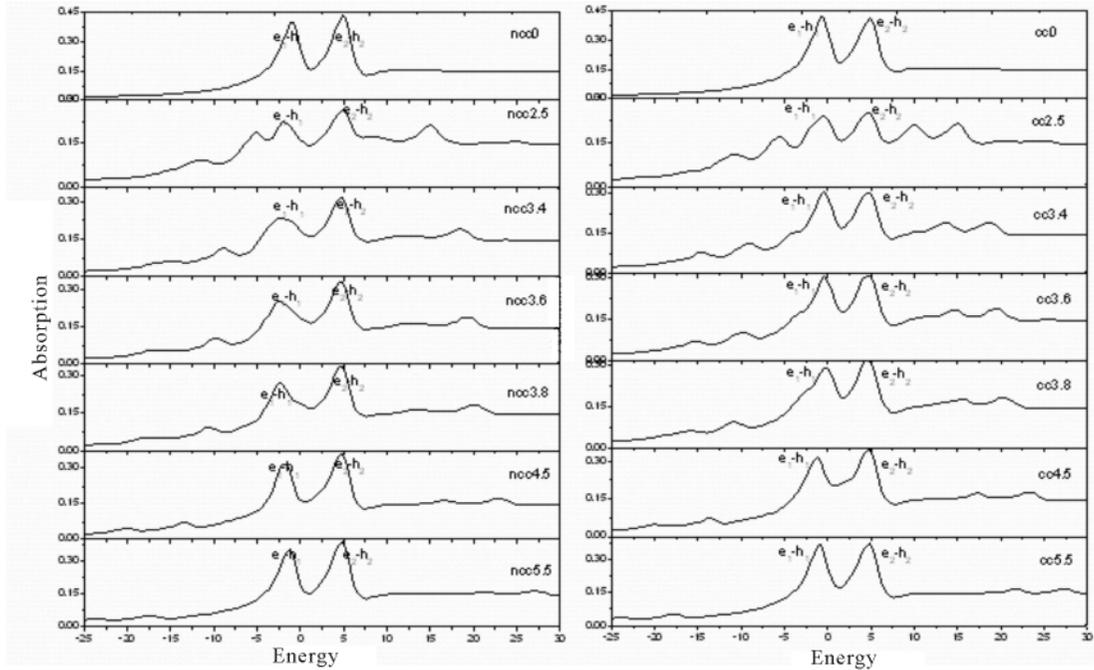


图 3 非对称双量子阱包括(cc)和不包括(ncc)库仑作用的光吸收谱,太赫兹场的强度为 8.5 kV/cm,频率从 0 变到 5.5 THz

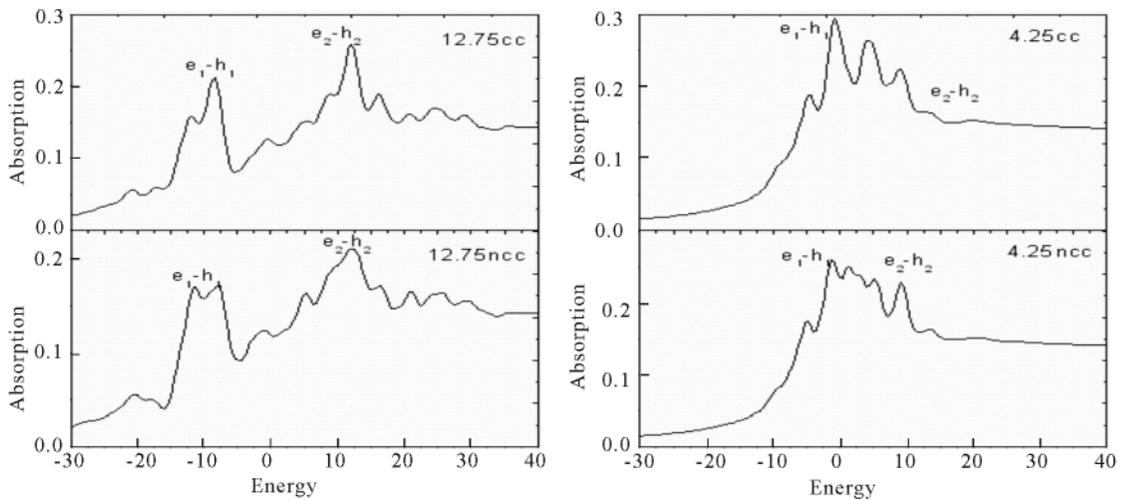


图 4 非对称双量子阱包括(cc)和不包括(ncc)库仑作用的光吸收谱,太赫兹场的强度分别为 12.75 kV/cm 和 4.25 kV/cm,频率为 1 THz

3 结论

通过密度矩阵理论方法,研究了在超快脉冲及太赫兹场作用下 GaAs 量子阱的光吸收谱.当没有外电场作用时,量子阱光吸收谱呈现出 2 个台阶,它们分别对应 e_1-h_1 及 e_2-h_2 跃迁.在外加直流或交流偏压时,由于量子约束斯塔克效应,光吸收谱呈现出多个激子吸收峰.改变太赫兹的强度,吸收谱出现恶歇分裂,从而产生带边吸收.这些分裂主要来源于太赫兹作用下激子的非线性效应,且边带的强度与太赫兹的频率及强度有关.

对非对称双量子阱施加太赫兹场, e_1-h_1 激子峰左边出现 2 个复制峰, e_2-h_2 激子峰右边也出现 2 个复制峰.随着太赫兹场强度增大,低能复制峰出现红移,而高能复制峰出现蓝移.当 $F_{ac}=12.75$ kV/cm, e_2-h_2 激子峰右边出现 4 个复制峰.

参考文献:

- [1] MASLOV A V, CITRIN D S. Optical Absorption of THz-Field-Driven and Dc-Biased Quantum Wells [J]. Phys. Rev. B, 2001, 64: 155 309.
- [2] KONO J. Resonant Terahertz Optical Sideband Generation from Confined Magnetoexcitons [J]. Phys. Rev. Lett.,

- 1997,79;1 758.
- [3] PHILLIPS C. Generation of First-Order Terahertz Optical Sidebands in Asymmetric Coupled Quantum Wells [J]. Appl. Phys. Lett., 1999,75;2 728.
- [4] LEE D S, MALLOY K J. Analysis of Reduced Interband Absorption Mechanism in Semiconductor Quantum Well [J]. IEEE J. Quantum Electron., 1994,30;85-92.
- [5] FROMHERTZ T. Floquet States and Intersubband Absorption in Strongly Driven Double Quantum Wells [J]. Phys. Rev. B, 1997,56;4 772.
- [6] MASLOV A V, CITRIN D S. Numerical Calculation of the Terahertz Field-Induced Changes in the Optical Absorption in Quantum Wells [J]. IEEE Sel. Top. Quantum Electron., 2002(8);457.
- [7] HAUG H, JAUHO A-P. Quantum Kinetics in Transport and Optics of Semiconductors [M]. Berlin; Springer Series in Solid-State Sciences, 1996.
- [8] KIRA M. Quantum Theory of Spontaneous Emission and Coherent Effects in Semiconductor Microstructures [J]. Pro. Quantum Electron., 1999,23;189.

Optical Absorption in Terahertz-Driven GaAs Quantum Well

SHI Chang-bo, PENG Jin-zhang, MI Xian-wu

(College of Physics Science and Information Engineering, Jishou University, Jishou 416000, China)

Abstract: The optical absorption spectra in quantum well driven by both an intense growth-direction-oriented terahertz (THz) and an optical pulse are calculated within the theory of density matrix. It is shown that the electric field produces multiple absorption peaks which come from the quantum confined Stark effect. Much rich optical absorption spectra and the excitonic peak spiting show up when changing the THz field intensity. The Autler-Towns splitting results from the THz nonlinear dynamics of confined excitons and result in the band side generation.

Key words: optical absorption spectrum; quantum well; terahertz

(责任编辑 陈炳权)

(上接第 43 页)

Method of Treating Data in Metallic Linear Expansion Coefficient Experiments Based on Origin

LIU Yang

(Experimental Center of Electrics and Mechanics, Yuncheng University, Yuncheng, 044000, China)

Abstract: The Origin software is applied to the linear fitting and mapping of the data in metallic linear expansion coefficient experiment. The experiment result shows an excellent accordance with the results of data treatment by the method of successive difference. The experiment is concise, rapid, and direct, and it can avoid producing error from the manual treatment.

Key words: Origin software; data treatment; metallic linear expansion coefficient; method of successive difference

(责任编辑 陈炳权)