

掺杂浓度和温度对 δ 掺杂的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 双量子阱系统电子态结构和子带间光学吸收系数的影响

杨双波, 赵恒飞

(“大规模复杂系统数值模拟”江苏省重点实验室, 南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 在有效质量近似下, 通过自洽求解薛定谔方程和泊松方程, 计算了在温度不为零时 δ 掺杂的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 双量子阱系统的电子态结构. 研究了温度和掺杂浓度对双量子阱系统子带能级、费米能量、及子带间线性光学吸收系数的影响. 研究发现, 系统的本征能量随温度升高或随掺杂浓度的增大而增加; 费米能量随温度升高而减小, 随掺杂浓度的增大而增加; 子带间总的吸收系数随温度的升高而减小, 随掺杂浓度的增大而增加. 除子带间跃迁 $3 \rightarrow 6, 4 \rightarrow 5$ 随温度升高线性光学吸收系数增加外, 其他各主要子带间跃迁随温度升高线性光学吸收系数而减小; 各子带间线性光学吸收系数随掺杂浓度的增大而增加.

[关键词] $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 双量子阱, 掺杂浓度, 子带间线性光学吸收系数

[中图分类号] O413.1 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2015)02-0023-07

Effect of Doping Concentration and Temperature on Structure of Electronic State and Intersubband Linear Optical Absorption of δ -Doped $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ Double Quantum Well

Yang Shuangbo, Zhao Hengfei

(Jiangsu Key Laboratory for NSLSCS, School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: By solving Schrödinger equation and Poisson equation self-consistently under the effective mass approximation, we calculated the structure of the electronic state of δ -doped $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ double quantum well system at $T \neq 0$. We studied the influence of temperature and the doping concentration on the subband energy levels, Fermi energy, and the linear optical absorption coefficient of the intersubband transition. Studies found that the subband energies increase with the increase of the temperature or the doping concentration; the Fermi energy decreases with the increase of the temperature, and increases with the increase of the doping concentration; the total linear optical absorption coefficient for the intersubband transition decreases with the increase of the temperature, and increases with the increase of the doping concentration. Except that the linear optical absorption coefficient increases with the increase of the temperature for the intersubband transitions $3 \rightarrow 6$ and $4 \rightarrow 5$, all other significant linear optical absorption coefficients of intersubband transitions decrease with the increase of the temperature; and the linear optical absorption coefficients of all the intersubband transitions increase with the increase of the doping concentration.

Key words: $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ double quantum well, doping concentration, intersubband optical absorption coefficient

自从 1969 年超晶格的概念被提出以来, 分子束外延技术不断完善, 半导体掺杂和半导体多量子阱结构的研究也受到越来越多的关注. 人们发现不同的掺杂方式^[1-4]、掺杂浓度以及单量子阱结构、多量子阱结构等因素会对系统的电子态结构及系统的光学性质和电学性质产生很大的影响. 在过去的近 30 年里, 人们已经对掺杂的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 结构进行了诸多的理论研究^[5-9], 研究方面包括掺杂方式、势阱结构等. 掺杂方式上包括调制掺杂^[10]、 δ 掺杂、双 δ 掺杂等, 势阱结构上包括单量子阱结构^[11,12]、双量子阱结

收稿日期: 2014-09-15.

通讯联系人: 杨双波, 博士, 教授, 研究方向: 低维半导体量子系统. E-mail: yangshuangbo@njnu.edu.cn

构^[13-17]和多量子阱结构^[18,19]等.

在双量子阱和多量子阱结构的研究中,人们较多关注的是势阱结构,如阱宽、垒宽、垒高等因素,对电子态结构的影响,而对温度及掺杂浓度的效应很少关注. 如 Yesilgul U^[13]研究了 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 半 V 形势阱的双势阱结构的光学性质与势阱结构参数的关系,发现当中间势垒的宽度增大时,系统第一、第二能级的差值在缩小,线性和非线性折射率的共振峰的变化量级增大;当 Al 的组分增加时,总的折射率减小,其共振峰发生蓝移. Trinath 等人^[20]研究了低温下抛物形 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 双量子阱结构电子的迁移率与阱宽的关系,发现这种抛物结构电子迁移率在大阱宽下得到相当大的加强. Lei 等人^[21]研究了 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ 双量子阱系统左阱宽对子带间跃迁吸收系数及波长的影响. 所有这些研究并未涉及温度和掺杂浓度对材料电子态结构的影响,也未对温度和掺杂浓度对子带间光学吸收系数的影响进行研究. 本文在此基础上对 δ 掺杂的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 双势阱结构进行研究,研究温度和掺杂浓度对子带能级、子带间光学吸收系数等材料性质的影响,文中势阱采用方形双势阱结构,掺杂部分位于中心势垒中.

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 双势阱结构是超晶格量子体系中常见的一种势阱结构,势阱材料为 GaAs,势垒材料为 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. δ 掺杂是获得准二维自由电子的有效途径,由于中心势垒 δ 掺杂,势垒中的电子向势阱中移动,使大部分的电子集中在势阱中,势阱和势垒界面出现能带弯曲,电子在阱中受到 Z 方向的约束,体现出准二维电子气特征. 本文通过自洽求解薛定谔方程和泊松方程,研究了 δ 掺杂的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 双势阱结构中温度、掺杂浓度对各能量本征值、费米能级、以及子带间光学吸收系数的影响. 研究发现,各能量本征值随温度的升高或掺杂浓度的增大而增加,费米能级随温度的升高而减小,随掺杂浓度的增大而增加;子带间总吸收系数随温度升高而减小,随掺杂浓度的增大而增加.

1 模型与理论

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 双势阱结构中势能函数为 $V_0(z)$,中间势垒宽度为 L_b ,两边的势阱呈对称分布,单势阱宽度为 L_w . 掺杂部分位于中间势垒中(δ 掺杂),掺杂层的有效厚度为 L_d , x 为 Al 的组份,它决定势垒高度.

量子阱中电子的各级本征能量 E_i 及其本征波函数 ψ_i 满足以下形式的薛定谔方程:

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2} \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{m^*(z)} \frac{d}{dz} \right) + V_H(z) + V_0(z) \right] \psi_i = E_i \psi_i(z), \quad (1)$$

这里 $m^*(z)$ 是电子的有效质量分布,在势阱内取值为 m_w^* ,在势垒中取值为 m_b^* . V_H 是自洽势, z 垂直于掺杂层的方向, i 为子带的指数,势能函数 $V_0(z)$ 满足以下条件:

$$V_0(z) = \begin{cases} 0, & \frac{L_b}{2} \leq z \leq \frac{L_b}{2} + L_w, \text{ 或者 } -L_w - \frac{L_b}{2} \leq z \leq -\frac{L_b}{2}, \\ V_b, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

V_H 的值可以通过求解以下形式的泊松方程得到:

$$\frac{d}{dz} \left[\varepsilon(z) \frac{d}{dz} V_H(z) \right] = -4\pi e^2 [N(z) - N_d(z)], \quad (3)$$

$\varepsilon(z)$ 是介电函数,在势阱内取为 ε_w ,在势垒内取为 ε_b . $N_d(z)$ 是电离掺杂物总密度分布

$$N_d(z) = n_{2d} \exp(-z^2/\beta^2) / \sqrt{\pi} \beta, \quad (4)$$

β 是反映掺杂层半宽度的物理量. 量子阱中第 i 个子带的电子浓度为

$$n_i = \frac{m_w^* k_B T}{\pi \hbar^2} \ln \{ 1 + \exp[(E_F - E_i)/k_B T] \}, \quad (5)$$

式中: k_B 是玻尔兹曼常数, T 是温度, E_F 是费米能级,那么量子阱中的电子密度为:

$$N(z) = \sum_{i=1}^{n_d} n_i |\psi_i(z)|^2, \quad (6)$$

式中: n_d 是填充态的数目.

由于未掺杂的载流子浓度远小于掺杂杂质的电子浓度,因此可以忽略本征载流子的贡献,假设掺杂物

全部电离,使得量子阱中的电子数目等于带正电的电离掺杂物的数目,即

$$\sum_{i=1}^{n_d} n_i = n_{2d}, \quad (7)$$

n_{2d} 是掺杂总浓度.

在得到了子带能量、本征波函数、费米能级、自洽势以后,我们可以计算掺杂后的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 双势阱的子带间线性光学吸收系数 $\alpha_{if}(\hbar\omega)$,其中, i 与 f 分别是初态与末态的指数

$$\alpha_{if}(\hbar\omega) = \frac{\mu c m_w^* k_B T e^2}{\pi \hbar^2 L_0 n_r \omega} \cos^2(\theta) |M_{fi}|^2 \ln \left\{ \left[1 + \exp\left(\frac{E_F - E_i}{k_B T}\right) \right] \left[1 + \exp\left(\frac{E_F - E_f}{k_B T}\right) \right] \right\} \frac{\Gamma/2}{(\hbar\omega - E_{fi})^2 + (\Gamma/2)^2}, \quad (8)$$

式中: M_{fi} 是矩阵元定义为

$$M_{fi} = \frac{E_i - E_f}{i\hbar} \int_{-L_0/2}^{L_0/2} \psi_f^*(z) z \psi_i(z) dz, \quad (9)$$

$E_{fi} = E_f - E_i$, E_i 和 E_f 分别代表初态能级和末态能级的能量, μ 是磁导率, c 是光速, L_0 是电子的有效活动范围. θ 是极化矢量方向与量子阱中 z 轴方向的夹角. n_r 是折射率, $\hbar\omega$ 是入射光子的能量, Γ 是线宽度.各子能带间总的线性吸收系数为

$$\alpha_i(\hbar\omega) = \sum_i \sum_{f=i+1} \alpha_{if}(\hbar\omega). \quad (10)$$

2 自洽计算及结果

参数设置如下:对 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$,取 $x=0.4$,那么总能带不连续由 $\Delta E_g = 1.155x + 0.37x^2$ 给出,异质结的势垒高为 $V_b = 0.85\Delta E_g = 0.3977 \text{ eV}$ ^[22,23].电子在势阱GaAs中的有效质量为 $m_w^* = 0.07m_0$,在势垒 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 中有效质量为 $m_b^* = 0.088m_0$, m_0 为自由电子的质量.GaAs势阱的介电常数为 $\epsilon_w = 13.0$, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 势垒的介电常数 $\epsilon_b = 12.1$.单势阱的宽度 $L_w = 135 \text{ \AA}$,中央势垒宽度为 $L_b = 30 \text{ \AA}$,掺杂半宽度 $\beta = 6 \text{ \AA}$.取本征态数目 $n_d = 8$,半线宽度 $\Gamma/2 = 10 \text{ meV}$.电子的有效活动范围为 $[-L_0/2, L_0/2]$,其中 $L_0 = 400 \text{ \AA}$.

由于势能函数 $V_0(z)$,有效质量函数 $m^*(z)$,及介电函数 $\epsilon(z)$ 等是分段连续的,为了自洽地求解薛定谔与泊松方程我们需要把空间划分为5个区域分别为 $z \leq -L_b/2 - L_w$; $-L_b/2 - L_w < z \leq -L_b/2$; $-L_b/2 < z \leq L_b/2$; $L_b/2 < z \leq L_b/2 + L_w$; $z > L_b/2 + L_w$ 等.我们在每个区域内数值求解薛定谔方程,并利用 ψ 及 $[1/m^*(z)]d\psi/dz$ 在两个不同区域分界面上连续的条件得到给定势能 $V_0 + V_H$ 的解,即能量本征值及本征函数.我们在每个区域内数值求解泊松方程,并利用 $V_H(z)$ 及 $\epsilon(z)dV_H(z)/dz$ 在两个不同区域分界面上连续的条件得到给定电荷分布的自洽势解 $V_H(z)$.自洽计算上我们首先令自洽势 $V_H = 0$,求得系统本征能量及本征波函数,然后将得到的本征值代入式(5)和(7)数值求解费米能级 E_F ;利用费米能级 E_F 及本征函数由式(6)计算电子密度分布 $N(z)$,然后从泊松方程的数值解得到自洽势 V_H 的一级迭代近似.将自洽势的一级迭代近似 V_H 代入原薛定谔方程求解,得到新的本征值和本征波函数,求出新的费米能级,再代入泊松方程求解得到自洽势的二次迭代近似.对比两次求得的自洽势,如果两者之差不在误差范围内,继续迭代直至两者之差在误差范围内时停止程序,这样就得到了最终的能量本征值和本征波函数.

2.1 自洽势,电子密度分布,本征能量,本征包络波函数

在掺杂浓度 $n_{2d} = 4.0 \times 10^{-4} \text{ \AA}^{-2}$,温度 $T = 150 \text{ K}$ 下我们计算了系统的自洽势能、电子密度分布、本征能量、本征包络波函数和费米能级,其结果示于图1.可以看出,自洽势的形状与中心掺杂的单量子阱^[25]的自洽势相同;电子密度主要(97.0%)分布在左右势阱内,中央势垒内分布极少.因为电子与带正电的离子处于不同的区域,电子的迁移率很高,所以这种掺杂结构对高速光电子器件的设计是很重要的.图1(c)~1(f)是前8个本征态,分为4组.每一组两个本征态中能量很接近,波函数的宇称相反,较低能级为偶宇称态,较高能级为奇宇称态,称为双重态(Doublet).双重态中能量之差随中央势垒的宽度的增加而减小,当势垒较宽,二量子阱成为两个独立量子阱时,双重态中能量之差为0,能量等于单量子阱的能量.费米能级 $E_F = 0.207764 \text{ eV}$,处于第二与第三能级之间,很接近第三能级,所以电子主要布居1、2能级(共89.77%),3、4能级有少量布居(共10.2%),5~8能级布居更少,分别比3、4能级布居小3至9个量级.

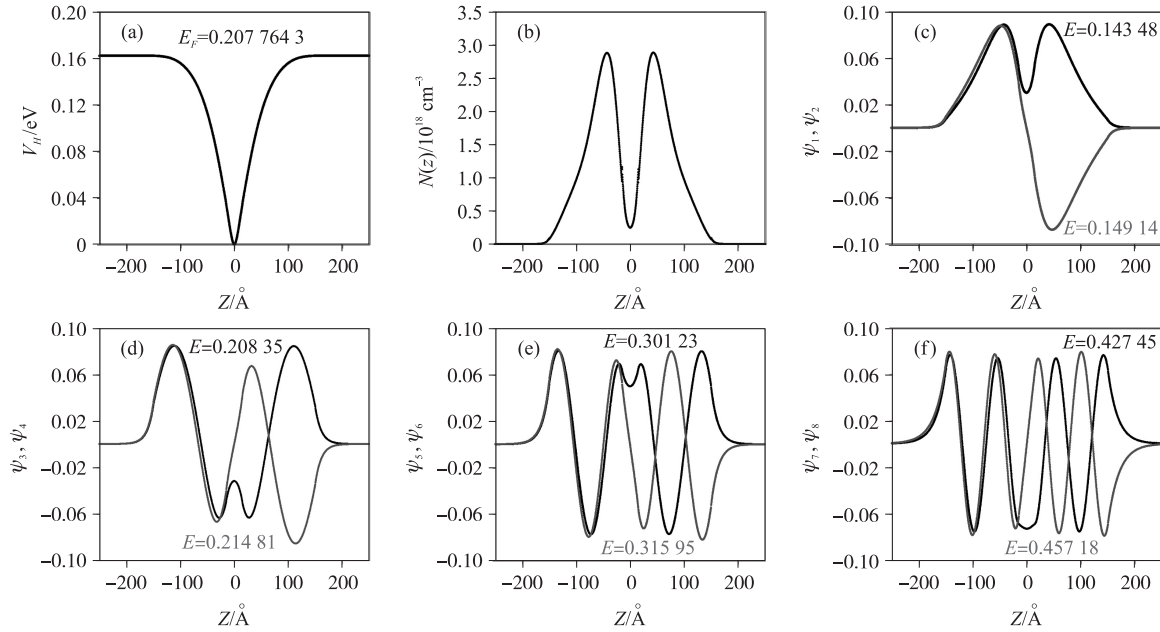


图 1 在掺杂浓度 $n_{2d} = 4.0 \times 10^{-4} \text{ Å}^{-2}$, 温度 $T = 150 \text{ K}$, δ 掺杂的双量子阱系统的电子态结构。

(a) 自洽势分布; (b) 电子密度分布; (c) ~ (f) 最低的 8 个本征态; 系统的费米能量为 $E_F = 0.207 764 31 \text{ eV}$ 。

Fig. 1 Electronic structure for a doped double quantum well system with doping concentration $n_{2d} = 4.0 \times 10^{-4} \text{ Å}^{-2}$ and temperature $T = 150 \text{ K}$. (a) self-consistent potential; (b) density of electron distribution; (c-f) the wave function for the first 8 eigenstates. Fermi energy $E_F = 0.207 764 31 \text{ eV}$

2.2 温度的影响

2.2.1 温度对能量本征值和费米能级的影响

对掺杂浓度 $n_{2d} = 4.0 \times 10^{-4} \text{ Å}^{-2}$, 温度在 $T = 10 \text{ K}$ 到 $T = 300 \text{ K}$ 的范围内我们计算了系统的能量本征值和费米能级, 其结果示于图 2。图 2 显示, 双重态的能量之差随能级的升高而增大; 费米能级在温度 $T \leq 100 \text{ K}$ 时处于第 3 与第 4 能级之间, 在 $T > 100 \text{ K}$ 时, 处于第 2 与第 3 能级之间, 且更靠近第 3 能级; 随温度升高各本征能量增加, 且较高能级增长速度较快, 费米能量减小。导致这种现象是由于温度升高时, 费米面附近电子的热动能增加, 跃迁到费米面以外的电子数目变大, 则费米面内的电子数目就会减少, 导致费米能级随温度的升高而降低。

2.2.2 温度对子带间跃迁线性光学吸收系数的影响

对掺杂浓度 $n_{2d} = 4.0 \times 10^{-4} \text{ Å}^{-2}$, 我们计算了子带间线性光学吸收系数 α 随温度 T 变化的关系, 对温度范围 $[10 \text{ K}, 300 \text{ K}]$ 的结果示于图 3(a) ~ (c)。可以看出子带对 (1, 4) 和 (2, 3) 有

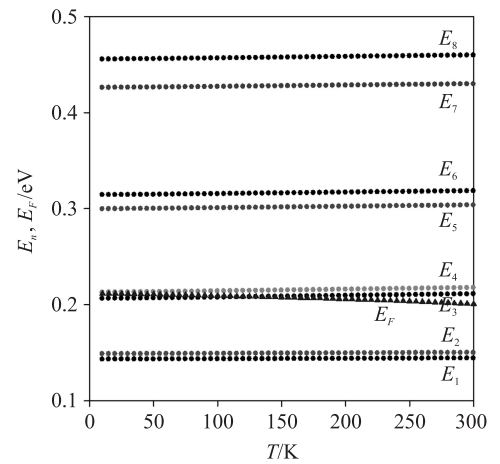


图 2 掺杂浓度 $n_{2d} = 4.0 \times 10^{-4} \text{ Å}^{-2}$, 子带能量及费米能级与温度 T 的关系

Fig. 2 Subband energy and Fermi level versus temperature T . Doping concentration $n_{2d} = 4.0 \times 10^{-4} \text{ Å}^{-2}$

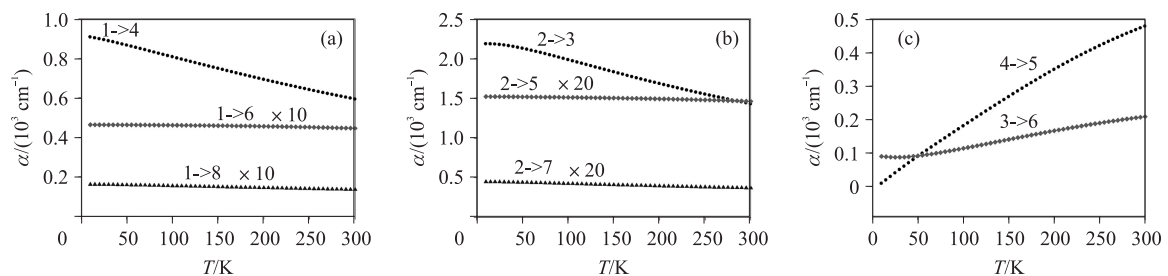


图 3 (a) ~ (c) 掺杂浓度 $n_{2d} = 4.0 \times 10^{-4} \text{ Å}^{-2}$, 不同子带间的吸收系数与温度的关系

Fig. 3 The intersubband absorption coefficient versus temperature, with doping concentration $n_{2d} = 4.0 \times 10^{-4} \text{ Å}^{-2}$

较强的吸收,(4,5)和(3,6)吸收较弱,(1,6),(1,8),(2,5),(2,7)吸收很弱.未显示的其他子带对(除了由于选择定则吸收为0的子带对外)吸收更弱,一般比吸收很弱的要小至少2个数量级.另一方面除了子带对(4,5),(3,6)的吸收系数值随温度升高而增加外,其他几个子带对的吸收系数随温度升高而减小.各子带间的吸收系数之和,即总吸收系数 α_t 随温度升高而减小,如图4所示.

2.3 掺杂浓度的影响

2.3.1 掺杂浓度对能量本征值和费米能级的影响

在温度 $T=150\text{ K}$, 掺杂浓度在范围 $[5\times 10^{-5}, 4.5\times 10^{-4}]/\text{\AA}^{-2}$ 内,我们计算了系统的能量本征值和费米能级与掺杂浓度的关系,其结果如图5所示.结果显示,随掺杂浓度的增大, E_1, \dots, E_8 各级本征能量及费米能级 E_F 单调增加,费米能量增长速度更快.在起始位置处,费米能级处于第1与第2能级之间更接近能级 E_1 ,而在末端处于第3与第4能级之间更接近 E_3 .在给定掺杂浓度下较低能量的双重态分裂很小,随能级的升高,分裂也逐渐增大.对给定的双重态,随掺杂浓度的增加,分裂也逐渐增大.

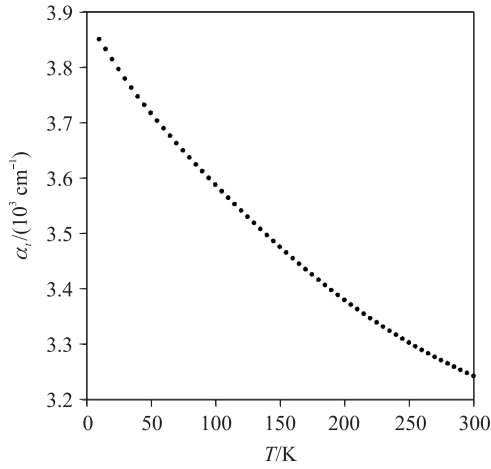


图4 掺杂浓度 $n_{2d}=4.0\times 10^{-4}\text{ \AA}^{-2}$,总吸收系数与温度的关系

Fig. 4 The total absorption coefficient versus temperature with doping concentration $n_{2d}=4.0\times 10^{-4}\text{ \AA}^{-2}$

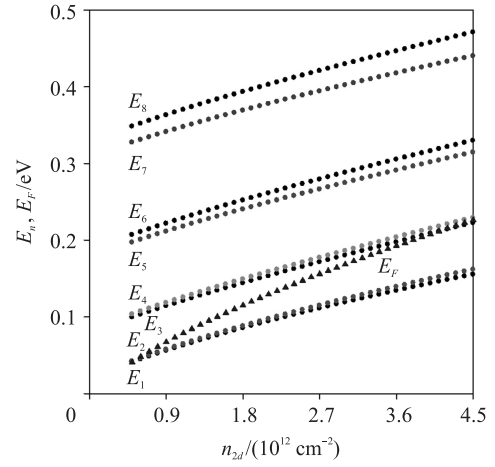


图5 $T=150\text{ K}$,子带能量及费米能级与掺杂浓度的关系

Fig. 5 Subband energy and Fermi level versus doping concentration n_{2d} at $T=150\text{ K}$

2.3.2 掺杂浓度对子带间跃迁线性光学吸收系数及总吸收系数的影响

在温度 $T=150\text{ K}$, 掺杂浓度范围在 $[5\times 10^{-5}, 4.5\times 10^{-4}]/\text{\AA}^{-2}$ 内,我们计算了子带间跃迁线性光学吸收系数 α_{if} 及总的吸收系数 α_t , 对设定的 $\hbar\omega=0.01\text{ eV}$, 其结果示于图6(a)~(c)和图7.可以看出,随掺杂浓度的增大,各子带间吸收系数 α_{if} 及总吸收系数 α_t 单调增加(除 α_{14} 在 $n_{2d}>3.0\times 10^{-4}\text{ \AA}^{-2}$ 时开始渐减外).各子带间吸收系数按从大到小的顺序排列如下(取最大掺杂浓度处为参考): $\alpha_{23}>\alpha_{14}>\alpha_{45}>\alpha_{36}>\alpha_{25}>\alpha_{16}>\alpha_{27}>\alpha_{18}$, 其他子带间吸收系数比 α_{18} 小3~5个数量级(图中未显示).

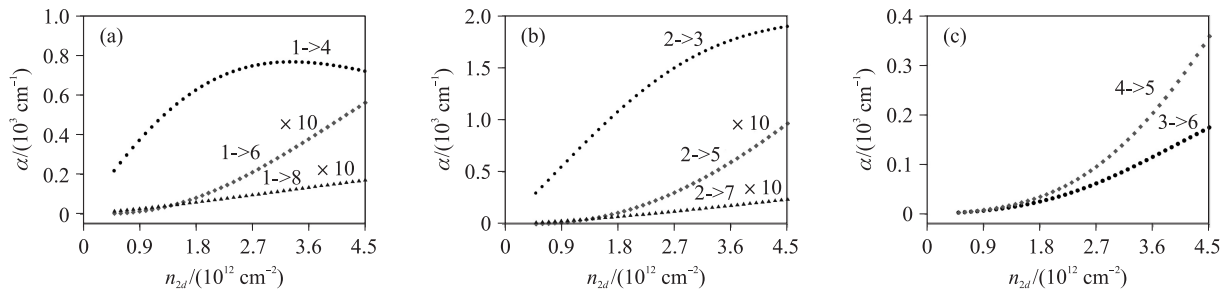


图6 (a)~(c) 温度 $T=150\text{ K}$,不同子带间跃迁吸收系数与掺杂浓度的关系

Fig. 6 The intersubband absorption coefficient versus doping concentration at temperature $T=150\text{ K}$

2.4 子带间跃迁线性光学吸收系数与入射光子能量的关系

在掺杂浓度 $n_{2d}=4.0\times 10^{-4}$, 温度 $T=150\text{ K}$ 我们计算了子带间吸收系数与入射光子能量 $\hbar\omega$ 的关系,结果如图8(a)~(d)所示.在入射光能量范围 $[0.01, 0.5]/\text{eV}$ 内,各子带间吸收只有1个谐振峰,位置与吸收子带

间能量差有关. 吸收峰 α_{14} 和 α_{23} 属于第一个双重态(能级 1, 2)和第二个双重态(能级 3, 4)之间的跃迁吸收, 它们峰值的位置接近, 二吸收峰有较强的重叠. 吸收峰 α_{36} 和 α_{45} 属于第二个双重态(能级 3, 4)和第三个双重态(能级 5, 6)之间的跃迁吸收, 它们的峰值大小接近, 峰值的位置也很靠近, 二吸收峰有较强的重叠. α_{45} 与吸收峰 α_{14} 和 α_{23} 重叠也较大. 吸收峰 α_{16} 和 α_{25} 属于第一个双重态和第三个双重态之间的跃迁吸收, 有较强重叠. 吸收峰 α_{18} 和 α_{27} 属于第一个双重态和第四个双重态之间的跃迁吸收, 重叠较小. 吸收峰 α_{38} 和 α_{47} 属于第二个双重态和第四个双重态之间的跃迁吸收, 有较强重叠等. 从强度看, α_{23} 的峰值最大, 并有如下顺序(取峰的值): $\alpha_{23} > \alpha_{14} > \alpha_{45} > \alpha_{36} > \alpha_{25} > \alpha_{16} > \alpha_{27} > \alpha_{18} > \alpha_{47} > \alpha_{38}$. 这些结果与式(8)和(9)是一致的. 总的吸收系数与入射光子能量的关系由图 9 给出. 自左向右第一个峰主要是 α_{14} 、 α_{23} 、 α_{45} 的贡献, 第二个峰主要是 α_{36} 的贡献, 第三个峰主要是 α_{16} 和 α_{25} 的贡献, 第四个峰主要是 α_{27} 的贡献, 第五个峰主要是 α_{18} 的贡献, 其他子带间跃迁对吸收的贡献甚微.

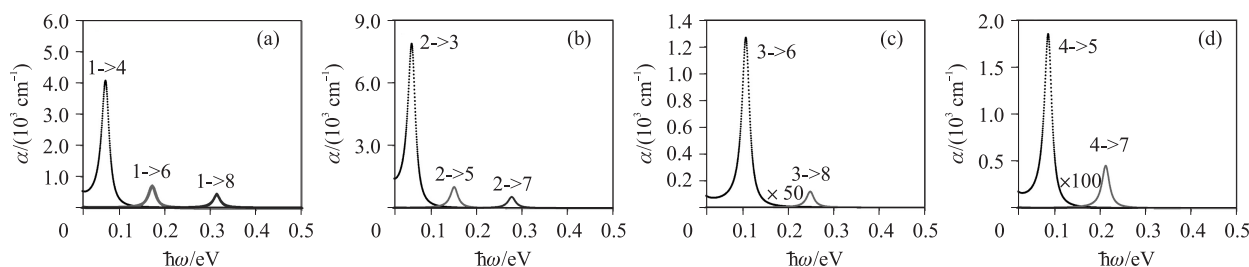


图 8 掺杂浓度 $n_{2d} = 4.0 \times 10^{-4} \text{ \AA}^{-2}$, 温度 $T = 150 \text{ K}$ 下, 不同子带间跃迁吸收系数与入射光子能量之间的关系

Fig. 8 The intersubband absorption coefficient versus photon energy at doping concentration $n_{2d} = 4.0 \times 10^{-4} \text{ \AA}^{-2}$ and temperature $T = 150 \text{ K}$

3 总结与讨论

在有效质量近似下, 通过自洽地求解薛定谔方程及泊松方程, 本文计算了中心势垒 δ 掺杂的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 双量子阱系统的电子态结构, 研究了温度及掺杂浓度对本征能量、费米能级、子带间跃迁线性光学吸收系数及总吸收系数的影响. 在给定温度及掺杂浓度下研究了子带间线性光学吸收系数及总吸收系数与入射光子能量的关系.

研究发现, 随温度升高电子的各本征能级升高, 费米能级下降, 子带间跃迁的总吸收系数降低. 子带跃迁 $4 \rightarrow 5$, $3 \rightarrow 6$ 的吸收系数随温度升高而上升, 其他子带间吸收系数随温度升高而下降. 主要吸收发生在 $2 \rightarrow 3$, $1 \rightarrow 4$, $3 \rightarrow 6$, $4 \rightarrow 5$ 中, 且 $\alpha_{23} > \alpha_{14} > \alpha_{45} > \alpha_{36}$. 在给定温度下, 随掺杂浓度的增大, 各本征能级及费米能级升高, 费米能级升高的速度更快; 子带间吸收系数及总吸收系数变大, 主要吸收发生在 $2 \rightarrow 3$, $1 \rightarrow 4$, $3 \rightarrow 6$, $4 \rightarrow 5$ 跃迁上, 并且 $\alpha_{23} > \alpha_{14} > \alpha_{45} > \alpha_{36}$. 在给定温度及掺杂浓度下, 随入射光子能量的增加, 各子带间只有 1 个谐振吸收峰出现, 并且吸收系数峰的强度按 $\alpha_{23} > \alpha_{14} > \alpha_{45} > \alpha_{36}$ 排列.

与阱中心掺杂的 GaAs 单量子阱的结果比较发现, 自洽势的形状^[24]是相同的, 温度效应^[25]是相同的, 掺杂的浓度效应^[25]也是相同的. 不同点是: (1) 电子密度的空间分布是完全不同的, 单势阱中电子密度分布的

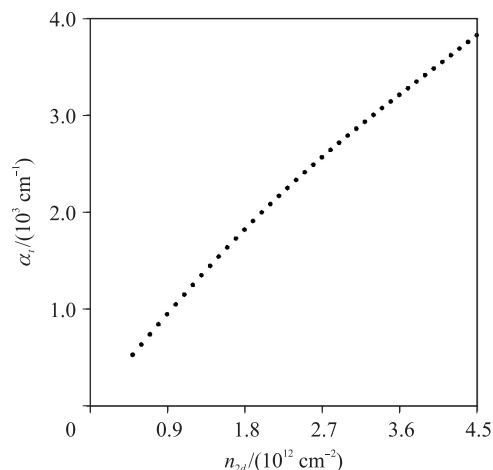


图 7 温度 $T = 150 \text{ K}$, 总吸收系数与掺杂浓度的关系

Fig. 7 The total absorption coefficient versus doping concentration at temperature $T = 150 \text{ K}$

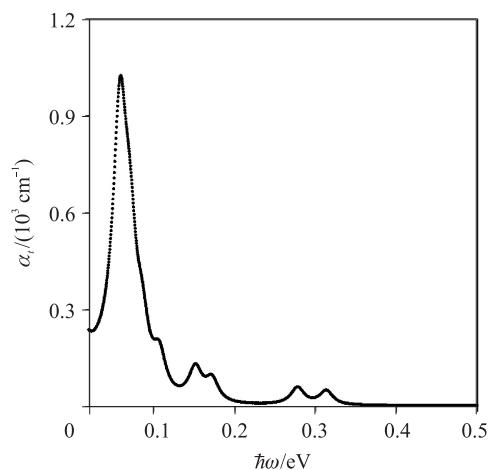


图 9 掺杂浓度 $n_{2d} = 4.0 \times 10^{-4} \text{ \AA}^{-2}$, 温度 $T = 150 \text{ K}$ 下, 总吸收系数与入射光子能量之间的关系

Fig. 9 The total absorption coefficient versus photon energy at doping concentration $n_{2d} = 4.0 \times 10^{-4} \text{ \AA}^{-2}$ and temperature $T = 150 \text{ K}$

最大值与带正电的离子中心重合,双势阱中电子密度分布的最小值与正离子中心重合,电子与正离子完全分离;(2)双势阱与单势阱的能级结构不同,双势阱中存在双重态,由此导致近简并的谐振吸收谱;(3)双势阱的费米能级低,而单势阱中费米能级较高.了解这些差别对光电子器件的设计与开发是有帮助的.

[参考文献]

- [1] Chang C Y, Lin W, Hsu W C, et al. The δ doped $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{GaAs}$ pseudomorphic high electron mobility transistor structures prepared by low-pressure metal organic chemical vapor deposition[J]. Jpn J Appl Phys, 1991, 30(6): 1 158–1 163.
- [2] Döhler G H, Künzel H, Olego D, et al. Observation of tunable band gap and two-dimensional subbands in a novel GaAs superlattice[J]. Phys Rev Lett, 1981, 47(12): 864–867.
- [3] Hai G Q, Studart N, Peeters F M. Electron mobility in two coupled δ layers[J]. Phys Rev: B, 1995, 52(15): 11 273–11 276.
- [4] Schubert E F, Ullrich B, Harris T D, et al. Quantum-confined interband absorption in GaAs saw tooth-doping superlattice[J]. Phys Rev: B, 1988, 38(12): 8 305–8 308.
- [5] Chadi D J, Chang K J. Theory of atomic and electronic structure of DX in GaAs and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ Alloy[J]. Phys Rev Lett, 1988, 61(7): 873–876.
- [6] 肖细凤, 康俊勇. AlGaAs/Sn 中俘获势垒的精细结构[J]. 物理学报, 2002, 51(1): 138–142.
- [7] Chemla D S, Miller D A B, Smith P W, et al. Room temperature excitonic nonlinear absorption and reflection in GaAs/AlGaAs multiple quantum well structures[J]. IEEE Quantum Electronics, 1984, 20(3): 265–275.
- [8] Li E H. Optical properties of an InGaAs-InP interdiffused quantum well[J]. IEEE Quantum Electronics, 1998, 34(7): 1 155–1 161.
- [9] 李文兵, 赵国忠, 王福合, 等. 半导体超晶格子带间跃迁光吸收理论研究[J]. 光子学报, 2006, 35(1): 61–64.
- [10] 舒强, 舒永春, 张冠杰, 等. 调制掺杂 GaAs/AlGaAs 2DEG 材料持久光电导及子带电子特性研究[J]. 物理学报, 2006, 55(3): 1 379–1 383.
- [11] 杨悦非, 朱蔚雯, 王渭源. GaAs/AlGaAs 量子阱中电子浓度的自洽计算[J]. 半导体学报, 1989, 10(5): 350–355.
- [12] Kane M J, Emeny M T, Apsley N, et al. Intersubband absorption in GaAs/AlGaAs single quantum well[J]. Semiconductor Science and Technology, 1998, 3(7): 722–725.
- [13] Yesilgul U. Linear and nonlinear intersubband optical absorption coefficients and refractive index changes in symmetric double semi-V-shaped quantum wells[J]. J Luminescence, 2012, 132(3): 765–773.
- [14] 王杏华, 郑厚植, 李承芳, 等. GaAs/AlGaAs 双量子阱中量子相干性研究[J]. 半导体学报, 1994, 15(10): 711–714.
- [15] Kim K T, Lee S S, Chuang S L. Inter-miniband optical absorption in a modulation-doped $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ superlattice[J]. J Appl Phys, 1991, 69(9): 6 617–6 624.
- [16] 梁霞霞, 李冀光, 董晨钟. 一维双势阱问题的理论研究[J]. 原子与分子物理学报, 2008, 25(5): 1 039–1 044.
- [17] 朱涛, 刘克家. 一维对称双势阱的精确解[J]. 贵州工业大学学报: 自然科学版, 2003(2): 1–4.
- [18] 曾安, 吴荣汉, 曾一平, 等. GaAs/AlGaAs 多量子阱激子吸收谱[J]. 半导体学报, 1989, 10(11): 881–883.
- [19] Roan E J, Chuang S L. Linear and nonlinear intersubband electro-absorptions in a modulation-doped quantum well[J]. J Appl Phys, 1991, 69(4): 3 249–3 260.
- [20] Sahu T, Palo S, Panda, A K. Enhancement of multisubband electron mobility in parabolic $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ double quantum wells[J]. J Appl Phys, 2013, 113(8): 083704–1–9.
- [21] Lei S Y, Shen B, Zhang G Y. Influence of width of left well on intersubband transitions in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ double quantum wells[J]. Chin Phys Lett, 2008, 25(9): 3 385–3 388.
- [22] Lee H J, Juravel L Y, Woolley J C. Electron transport and band structure of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ alloy[J]. Phys Rev: B, 1980, 21(2): 659–669.
- [23] Ronald L G, Krishan K B, Dwight E P. Energy levels of wannier excitons in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ quantum well structures[J]. Phys Rev: B, 1984, 29(4): 1 807–1 812.
- [24] 杨双波. 掺杂浓度及掺杂层厚度对 Si 均匀掺杂的 GaAs 量子阱中电子态结构的影响[J]. 物理学报, 2013, 62(15): 157 301–157 307.
- [25] 杨双波. 温度与外磁场对 Si 均匀掺杂的 GaAs 量子阱电子态结构的影响[J]. 物理学报, 2014, 63(5): 057 301–057 307.

[责任编辑: 顾晓天]