

基于带隙影响的量子阱红外探测器带宽的研究

王忠斌, 温廷敦, 许丽萍, 张家鑫
(中北大学理学院物理系, 山西 太原 030051)

摘要:量子阱红外探测器(QWIP)受到压强、掺杂浓度、温度等多种因素的影响,主要从温度对带隙影响方面进行了研究。以QWIP中的能级公式和能级间的电子跃迁为基础,首先通过GaAs和AlGaAs两种材料的带隙与温度的关系式,得到 ΔE_g 随温度的变化情况;接着利用吸收波长的公式计算出三种跃迁下的吸收波长与温度的关系;最后结合光电流谱以及不同情况下得到的三组吸收波长、波数值,分析了光电流峰位的变化,为解决QWIP的带宽问题提供了一种思路。

关键词:凝聚态物理;带宽;理论计算;量子阱红外探测器;带隙

中图分类号:TN214 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2011.12.010

Study on the bandwidth of quantum well infrared photo-detector

WANG Zhong-bin, WEN Ting-dun, XU Li-ping, ZHANG Jia-xin
(Department of Physics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Quantum well infrared photo-detector (QWIP) is influenced by many factors such as pressure, doping concentration, temperature and so on. This article mainly makes a study on the influence of temperature on band gap. At first, based on the energy level formula and electronic transition between energy levels in QWIP, the change of ΔE_g with temperature is derived through the relation between band gap of GaAs and AlGaAs and temperature. Then, using the formula of absorption wavelength, the absorption wavelength of the three transitions with temperature is calculated. Finally, with photocurrent spectrum and three group values of absorption wavelength and wave number, the change of photocurrent peak's position is analyzed, which provides a solution to the bandwidth problem of QWIP.

Key words: condensed matter physics; bandwidth; theoretical calculation; quantum well infrared photo-detector; band gap

1 引言

红外探测器是一种对于红外辐射进行高灵敏度感应的光电转换器件。QWIP是利用掺杂量子阱的导带中形成的子带间跃迁,即导带阱内基态载流子吸收红外辐射能量跃迁到高能态,并在外电场作用下输运,形成与入射光成正比的光电流,从而实现对外红外辐射的探测。也就是说,通过光电流的变化可实现对红外光辐射的探测。本论文以GaAs/Al_xGa_{1-x}As量子阱红外探测器为研究对象,从温度对GaAs和AlGaAs两种材料带隙的影响出发,进而分析了三种跃迁下吸收波长与温度的关系,最终得

到了光电流谱的变化情况,从而实现本论文的研究目的。

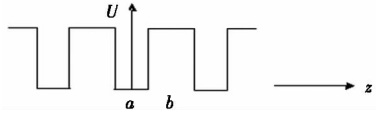
2 量子阱红外探测器的能级

图1为超晶格的势分布图, a, b, U 分别代表阱宽、垒宽和垒高,电子在阱中的有效质量为 m_a ,垒中为 m_b ,则在势垒区若电子能量为^[1]:

$$E_n = U + \frac{\hbar^2}{2m_b^*} \left(\frac{\pi}{b} \right)^2 \cdot n^2, n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

作者简介:王忠斌(1984-),男,在读硕士研究生,研究方向为介观光电器件。E-mail:wawawa-10@163.com

收稿日期:2011-04-04

图1 GaAs/Al_xGa_{1-x}As 超晶格的势分布Fig. 1 potential distribution of GaAs/Al_xGa_{1-x}As superlattice

这些电子对势垒的透过率最大。

势阱区对阱层透过率最大和最小的电子能量分别为:

$$E_{(n)} = \frac{\hbar^2}{2m_a} \left(\frac{\pi}{a} \right)^2 \cdot n^2, n=1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

$$E_{<n>} = \frac{\hbar^2}{2m_a} \left(\frac{\pi}{a} \right)^2 \left(n + \frac{1}{2} \right)^2, n=0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

能量为 $E_{<n>}$ 的电子波基本定域在阱区; $E_{<0>}$ 是阱中最低能级。阱中电子遵循费米分布^[2], 即电子占据费米能级和 E_n 之间各个能级。量子阱中的费米能级满足式(4):

$$E_F = \frac{\hbar^2 k_F^2}{2m_a} \quad (4)$$

式中, $k_F = \sqrt{2\pi\sigma}$, 其中 $\sigma = n_0 a$ 是电子的面密度; n_0 表示电子的体密度。

现给定相关结构参数^[3]: GaAs 阱宽 4.8 nm, 掺杂 Si ($n = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), Al_{0.3}Ga_{0.7}As 垒宽 10 nm, 共 50 周期。计算时用到的相关参数为: $\hbar = 1.054 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; $m_a = 0.067 m_0$; $m_b = (0.067 + 0.083x) m_0 = 0.092 m_0$ ^[4], 其中, $m_0 = 9.108 \times 10^{-31} \text{ kg}$ 是自由电子的质量。若不考虑温度对带隙的影响, 则 $\Delta E_g = 1.27x = 0.374 \text{ eV}$; $U_0 = 0.65 \Delta E_g = 0.243 \text{ eV}$ ^[5]。可以得到: $E_1 = U_0 + 0.0408 \text{ eV}$; $E_{(1)} = 0.244 \text{ eV}$; $E_{<0>} = 0.061 \text{ eV}$; $E_{<1>} = 0.549 \text{ eV}$; 对于费米能级, 若 $n_0 = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 可得 $E_F = 0.017 \text{ eV}$ 。如果将 $E_{<0>}$ 看成量子阱中电子的基态能级, 则 E_F 在 $E_{<0>}$ 以上 0.017 eV 处^[3]。

3 温度对 GaAs 和 Al_xGa_{1-x}As 带隙的影响

不考虑掺杂浓度对带隙影响时, GaAs 和 Al_xGa_{1-x}As 的禁带宽度分别可以表示为^[6]:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (5)$$

$$E_g(T, x) = \frac{A(T) + B(T)x + 130.24x^2}{225 + T + 88x} \quad (6)$$

式中, $E_g(T)$ 和 $E_g(0)$ 分表示温度为 T 和 0 K 时的禁带宽度; α 和 β 为温度系数。其中, 砷化镓的 0 K 时的禁带宽度 $E_g(0) = 1.519 \text{ eV}$, $\alpha = 5.405 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$, $\beta = 204 \text{ K}$ 。另外, $A(T) = 341.87 +$

$1.5194T - 5.5 \times 10^{-4} T^2$, $B(T) = 466.71 + 1.48T - 3.3 \times 10^{-4} T^2$ 。将以上参数代入, 并取 $x = 0.3$, 得到:

$$E_g^{\text{GaAs}}(T) = 1.519 - \frac{5.405 \times 10^{-4} T^2}{T + 204} \quad (7)$$

$$E_g^{\text{AlGaAs}} = \frac{493.6 + 1.9594T - (6.5 \times 10^{-4}) T^2}{T + 251} \quad (8)$$

上两式为 GaAs 和 Al_{0.3}Ga_{0.7}As 带隙与温度的关系式。

根据 $U = 0.65 \Delta E_g$, 温度变化会影响势垒高度 U 。由于温度变化只对势垒有影响(不考虑温度对阱宽和垒宽的影响), 势阱中的能级不会受到温度的影响。为了得到势垒高度 U 与温度的关系, 需得到 ΔE_g 与 T 的关系。根据下式:

$$\Delta E_g = (E_g^{\text{AlGaAs}} - E_g^{\text{GaAs}}) \frac{1}{1 + \Delta E_v / \Delta E_c} \quad (9)$$

取 $\Delta E_c / \Delta E_v = 0.6/0.4$, 将式(7)和式(8)代入式(9), 得:

$$\Delta E_g = \frac{13745.7 + 121.3T + 0.2661T^2 - (0.657 \times 10^{-4}) T^3}{(T + 251)(T + 204)} \text{ eV} \quad (10)$$

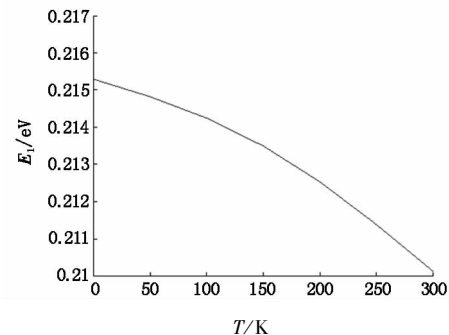
通过式(10)可得 U 与的 T 关系为:

$$U = \frac{8934.7 + 78.8T + 0.173T^2 - (0.427 \times 10^{-4}) T^3}{(T + 251)(T + 204)} \text{ eV} \quad (11)$$

根据式(1)以及所给相关参数, 可得:

$$E_1 = \frac{11023.8 + 97.4T + 0.214T^2 - (0.427 \times 10^{-4}) T^3}{(T + 251)(T + 204)} \text{ eV} \quad (12)$$

式(12)的计算结果如图2所示。

图2 E_1 与温度的变化曲线Fig. 2 curve of E_1 with temperature

4 吸收波长随温度变化计算结果

量子阱红外探测器的探测峰值波长 λ_p 是由下式表示的^[1]:

$$\lambda_p = hc/\Delta E \quad (13)$$

式中, h 和 c 分别是普朗克常数和真空中的光速; ΔE 是形成跃迁的两个能级的能量差。

以 $E_{<0>}$, $E_{<1>}$, $E_{(1)}$, E_1 各能级为研究对象, 当存在光激发时, 低能态电子可以向高能态跃迁, 图 3 为 $E_{<0>}$, E_F , $E_{(1)}$, E_1 , $E_{<1>}$ 能态之间的光跃迁图^[3]。由于带隙的变化只影响到势垒高度, 所以只需要考虑与 E_1 相关的跃迁的情况, 即:

$$E_{<0>} \rightarrow E_1:$$

$$\Delta E_1 =$$

$$\frac{7900.4 + 69.6T + 0.153T^2 - (0.427 \times 10^{-4})T^3}{(T+251)(T+204)}$$

$$E_F \rightarrow E_1:$$

$$\Delta E_2 =$$

$$\frac{7029.9 + 62.7T + 0.136T^2 - (0.427 \times 10^{-4})T^3}{(T+251)(T+204)}$$

$$E_1 \rightarrow E_{<1>}:$$

$$\Delta E_3 =$$

$$\frac{17087.2 + 152.4T + 0.335T^2 + (0.427 \times 10^{-4})T^3}{(T+251)(T+204)}$$

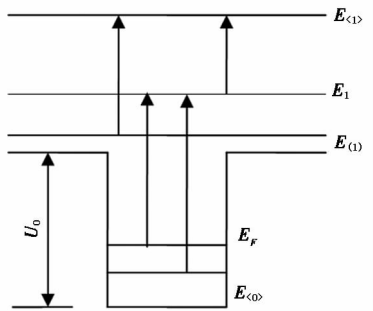


图 3 电子的光跃迁

Fig. 3 optical transition of electrons

将三种跃迁代入式 (13), 由参数 $h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$, $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$, 可以得到三种情况下的吸收波长 λ_p 与温度的关系:

$$\lambda_{p1} = \frac{hc}{1.602 \times 10^{-19} \Delta E_1} = \frac{1.24T^2 + 551.8T + 63493}{7900.4 + 69.6T + 0.153T^2 - (0.427 \times 10^{-4})T^3} \mu\text{m} \quad (14)$$

$$\lambda_{p2} = \frac{hc}{1.602 \times 10^{-19} \Delta E_2} =$$

$$\frac{1.24T^2 + 551.8T + 63493}{7029.9 + 62.7T + 0.136T^2 - (0.427 \times 10^{-4})T^3} \mu\text{m} \quad (15)$$

$$\lambda_{p3} = \frac{hc}{1.602 \times 10^{-19} \Delta E_3} =$$

$$\frac{1.24T^2 + 551.8T + 63493}{17087.2 + 152.4T + 0.335T^2 + (0.427 \times 10^{-4})T^3} \mu\text{m} \quad (16)$$

5 光电流峰位的变化

量子阱红外探测器中的电流是由两部分组成的^[7]: ①光电流, 占据基态的电子受光激发后, 从基态跃迁到激发态形成了光生载流子, 这些载流子在外加电压的作用下形成的光电流; ②暗电流, 是热激发到势垒边以上的热电子从一个量子阱区输运到下一个量子阱区形成的。通过测量光电流的变化可实现对光辐射的探测。

图 4 是实验测出的 $T = 77 \text{ K}$ 温度下的光电流谱^[3]。从图 4 可以看出, 光电流谱中存在很多电流峰, 最强的位于 $\nu = 1589 \text{ cm}^{-1}$ 处, 而在 $\nu = 1779 \text{ cm}^{-1}$, $\nu = 2129 \text{ cm}^{-1}$ 和 $\nu = 2401 \text{ cm}^{-1}$ 附近存在较弱的峰。

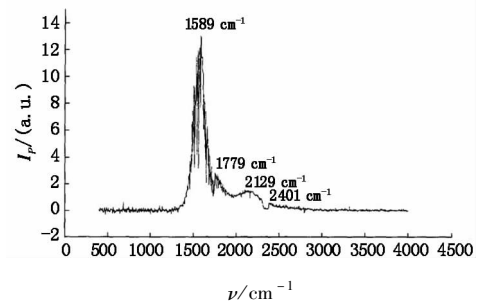


图 4 $T = 77 \text{ K}$ 时, $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 超晶格的光电流谱

Fig. 4 photocurrent spectrum of $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ superlattice in $T = 77 \text{ K}$

为了找到与光电流谱中峰值对应的跃迁能级, 下面计算出势垒高度不受温度影响时三种跃迁的吸收波长。不考虑温度对带隙影响时, 势垒高度 $U_0 = 0.243 \text{ eV}$, 可得到 $E_1 = 0.284 \text{ eV}$ 。此时三种跃迁情况下的吸收波长是 $\lambda_{p1} = 5560 \text{ nm}$; $\lambda_{p2} = 6018 \text{ nm}$; $\lambda_{p3} = 4679 \text{ nm}$ 对应的波数分别是 $\nu_1 = 1799 \text{ cm}^{-1}$; $\nu_2 = 1662 \text{ cm}^{-1}$; $\nu_3 = 2137 \text{ cm}^{-1}$ 。三种跃迁对应的波数 ν 的实验值依次是 1779 cm^{-1} , 1589 cm^{-1} 和 2129 cm^{-1} 。根据式 (14) ~ (16), 可以计算出 $T = 77 \text{ K}$ 时的吸收波长和波数的大小。为了便于比较, 现将三种情况下的波数和波长如表 1 所示。

表1 三种情况下的波数和波长

Tab.1 the wave number and wavelength
of three cases

波数		实验值	忽略温度影响	考虑温度影响
ν/cm^{-1}	ν_1	1779	1799	1248
	ν_2	1589	1662	1116
	ν_3	2129	2137	2717
$\lambda_p/\mu\text{m}$	λ_{p1}	5.621	5.560	8.010
	λ_{p2}	6293	6018	8.963
	λ_{p3}	4.697	4.679	3.681

结合表格中的数值以及光电流谱发现,当考虑温度影响时,基态到连续态跃迁(λ_{p1} 和 λ_{p2})产生的光电流峰值发生的红移,第三种跃迁产生的峰值向短波偏移。从光电流谱中发现,考虑温度影响后,1248 cm^{-1} ,1116 cm^{-1} ,2717 cm^{-1} 处(图4中光电流基本为0)也可以探测到光电流,从而改变了 QWIP 的带宽。

6 结 语

本文从温度对材料带隙影响出发,结合能级和波长公式,得到这种情况下的波长与温度的关系式,最后,分析了温度对波长的影响,并结合光电流谱以及三组波长与波数值,说明了温度对光电流响应峰位的影响,得到了带隙的变化对量子阱红外探测器的带宽有一定的影响,提供了一种研究带宽问题的新思路。实际中,量子阱红外探测器还受到其他因素(如:压强、内建电场、暗电流等)的影响,这些因素在实际的工作中也需要考虑到。

参考文献:

- [1] Guan Wenli, Lian Jie, Wang Qingpu, et al. Study on the infrared detector based on the electron wave interference [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2009, 30(6): 811 - 814. (in Chinese)
官文栋, 连洁, 王青圃, 等. 基于电子波干涉红外探测器的研究[J]. 半导体光电, 2009, 30(6): 811 - 814.
- [2] Kinch M A, Yariv A. Performance limitations of GaAs/Al-GaAs inf rared superlattices[J]. Appl. Phys. Lett. , 1989, 55(20): 2093 - 2095.
- [3] Cheng Xingkui, Zhou Junming, Huang Qi. E-reflection and interference of superlattice interface[J]. Science in China (Series A), 2001, 31(11): 1026 - 1031. (in Chinese)
程兴奎, 周均铭, 黄琦. 超晶格界面的电子反射与干涉[J]. 中国科学: A 辑, 2001, 31(11): 1026 - 1031.
- [4] Adachi S GaAs, AlAs, and $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$: material parameters for use in research and device applications[J]. J. Appl. Phys. , 1985, 58(3): R1 - 29.
- [5] Levine B F, Bethea C G, Shen V O, et al. Tunable long-wavelength detectors using graded barrier quantum wells grown by electron beam source molecular beam epitaxy [J]. Appl. Phys. Lett. , 1990, 57, (4): 383 - 385.
- [6] Wang Bin, Deng Jun, Xing Yanhui, et al. Energy level calculation of doping quantum well for QWIP[J]. Laser & Infrared, 2004, 34(3): 200 - 202. (in Chinese)
王斌, 邓军, 邢艳辉, 等. 量子阱红外探测器掺杂阱中能级的计算[J]. 激光与红外, 2004, 34(3): 200 - 202.
- [7] Fu Ying, Lu Wei. Semiconductor quantum device physics [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
傅英, 陆卫. 半导体量子器件物理[M]. 北京: 科学出版社, 2005.