

文章编号: 1672-8785(2013)07-0015-05

# AlGaAs/GaAs 量子阱探测器的 吸收光谱研究

赵 昆 杨希峰

(常熟理工学院物理与电子工程学院, 江苏 常熟 215500)

**摘 要:** 从定态 Schrodinger 方程出发, 研究了不同 Al 组分和不同温度对宽量子阱红外探测器吸收光谱的影响。当体系的费米能级固定后, 发现量子阱基态束缚能随着 Al 组分增长而变大, 且相应的吸收光谱峰值趋于短波。环境温度对 AlGaAs/GaAs 量子阱红外探测器的响应光谱影响不大。通过理论计算定量给出了 AlGaAs/GaAs 量子阱红外探测器吸收光谱随量子阱阱宽、Al 组分和温度变化的规律。

**关键词:** AlGaAs/GaAs 量子阱; 量子阱红外探测器; 吸收光谱

**中图分类号:** O472+.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.07.04

## Study of Absorption Spectrum of AlGaAs/GaAs Quantum Well Photodetectors

ZHAO Kun, YANG Xi-feng

(School of Physics and Electronic Engineering, Changshu  
Institute of Technology, Changshu 215500, China)

**Abstract:** Starting from the Schrodinger equation, the influence of different Al composition and different temperatures on the absorption spectra of wide quantum well infrared photodetectors (QWIP) is studied. It is found that when the Fermi level is fixed, the ground state bound energy of the quantum well may increase with the increasing of the Al composition and the corresponding absorption spectral peak tends to move toward the short wave. In addition, the influence of the ambient temperature on the response spectra of AlGaAs/GaAs QWIPs is negligible. After theoretical calculation, the rule of the absorption spectrum of an AlGaAs/GaAs QWIP changing with quantum well width, Al composition and temperature is given.

**Key words:** AlGaAs/GaAs quantum well; quantum well infrared photodetector; absorption spectrum

## 0 引言

近年来, 低微半导体材料逐渐显示出在光电方面的优越性, 被广泛应用于军事、医学以及日常生活中。在过去的几十年中, HgCdTe 探测器在红外探测器方面一直是研究的热点<sup>[1-3]</sup>。但

随着研究的深入, HgCdTe 材料逐渐暴露出很多局限性, 例如界面不稳定和面积不均匀, 并且由于外延生长和工艺上的困难, 成品率低, 生长成本高<sup>[4-7]</sup>。自 1983 年第一个量子阱红外探测器 (Quantum Well Infrared Photodetector, QWIP)

**收稿日期:** 2013-05-29

**作者简介:** 赵昆 (1990-), 男, 江苏扬州人, 本科, 主要从事光电子方面的研究。

E-mail: jsyzk\_7322968@yahoo.cn

问世以后<sup>[8]</sup>，因为该类型探测器拥有响应速度快、探测率高及生产工艺成熟等方面的优点，便引发了各国科学家的研究热情<sup>[9-13]</sup>。

通过外延生长技术引入应变特性的方法已被广泛应用于量子阱光电器件中。发展较快的量子阱光电器件主要是应变量子阱红外探测器和量子阱激光器。在实验中，人们通过引入应力进一步降低了 QWIP 的暗电流并增强了光吸收，使 QWIP 的性能得到进一步提高<sup>[14]</sup>。而 III-V 族半导体量子阱材料中的 AlGaAs/GaAs 量子阱，由于具有优越的光学性质，加上外延生长技术和器件工艺比较成熟，近二十年来科学家们对其进行了大量的研究。鉴于 AlGaAs/GaAs 量子阱的优越特性，由其制成的量子阱红外探测器和太阳能电池已经应用在太空中。随着电子元器件集成化和多元化进程的发展，AlGaAs/GaAs 量子阱红外探测器成为了红外焦平面研究的重点之一<sup>[15]</sup>。通过先进的生长工艺如金属有机化合物气相沉积 (Metal-organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 和分子束外延 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 等能够做出均匀性更好、面积更大和品质更高的多量子阱材料，进而做出规模较大的探测器阵列<sup>[16,17]</sup>。由于 AlGaAs/GaAs 量子阱具有较窄带宽的光谱响应、不同波段之间的光学串音较小等特点，尤其适合作为双色、多色量子阱焦平面探测器的制作材料。

针对 AlGaAs/GaAs 量子阱的重要应用，本文系统地探讨量子阱红外探测器吸收光谱随阱宽、Al 组分和温度变化的规律，为 AlGaAs/GaAs 量子阱器件性能的优化提供参考，并通过研究最终找到最适合量子阱工作的阱宽、Al 组分以及温度。

## 1 理论模型

为了提高量子阱红外探测器的探测效率，人们往往会生长多量子阱体系。量子阱势能随生长方向的分布函数可以表示为

$$V(z) = \begin{cases} V_0 & -\frac{W}{2} - B \leq z < -\frac{W}{2} \\ 0 & -\frac{W}{2} \leq z < \frac{W}{2} \\ V_0 & \frac{W}{2} \leq z < \frac{W}{2} + B \end{cases} \quad (1)$$

式中，W 和 B 分别为量子阱的阱宽和垒宽， $V_0$  为势垒高度。

在量子阱内，定态波动方程可以表示为

$$\frac{d^2}{dz^2}\psi_i(z) + \frac{2mE_i}{\hbar^2}\psi_i(z) = 0$$

通过求解上述方程可以得到量子阱中的束缚能  $E_i$  和相应的归一化波函数分布  $\psi_i(z)$ ，其中  $i$  表示第  $i$  个能级。在没有外加电场的情况下，量子阱的势能分布可以表示成式 (1) 的形式，相应的束缚能可以表示为

$$E_i = \frac{\hbar^2 \pi^2 i^2}{2m_0 W^2}$$

$$\psi_i = \sqrt{\frac{2}{W}} \sin\left(\frac{i\pi z}{W}\right) \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

但当存在外部和内部电场时，势垒的分布将受到调制，相应的束缚能和波函数也将发生变化。束缚能和波函数可以用几种方法计算。根据波函数的性质 (波函数连续，其一阶导数也连续)，可以用传输矩阵方法来计算任意形状量子阱的束缚能和相应的波函数。

当有光入射到量子阱结构时，如果入射波的能量不大，可以看作是微扰。在入射波的激发下，电子会以一定的几率从一个状态跃迁到另一个能量状态，这就表现为光的吸收。微扰势可以表示成  $H' = -\frac{ie\hbar}{m_0} \mathbf{A} \cdot \nabla$ ，其中， $m_0$  为电子的质量，假设入射波的偏振方向为  $e_s$ ，入射频率为  $\omega$  的波的单位电场分布可以表示成  $A(r, t) = \sqrt{\frac{\hbar}{2\omega\epsilon}}(b^+ + b^-)$ ， $b^+$  和  $b^-$  分别为光子的产生和湮灭算子。由 Feimi 黄金定则可以得到电子在光场微扰下从  $\psi_j(z)$  状态跃迁到  $\psi_i(z)$  状态的几率：

$$\frac{2\pi}{\hbar} < \psi_j(z), n_{ph} + 1 | H' | \psi_i(z), n_{ph} > |^2 \delta(E_i - E_j - \hbar\omega) \quad (3)$$

式中， $n_{ph}$  为光子个数，随着入射波频率  $\omega$  的变化，可得到不同量子阱对激发波长的吸收光谱。

本文主要通过改变量子阱的阱宽、Al 组分和工作温度来研究 AlGaAs/GaAs 量子阱红外探测器的吸收光谱的变化规律。

## 2 结果与分析

### 2.1 Al 组分对 AlGaAs/GaAs 量子阱红外探测器吸收光谱的影响

计算了 50 个周期的 AlGaAs/GaAs 量子阱探测器在室温下 (300 K) 的局域态分布, 其中 AlGaAs 的垒宽为 50.0 nm。假定 Al 的扩散长度为 0.01 nm, 势垒和接触点的掺杂分别为  $1.0 \times 10^{15}$  和  $2.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。Al 组分从 0.15 增至 0.85 时基态束缚能的变化规律如图 1 所示。选定 GaAs 阱底为参考面, 所以量子阱的束缚能大于零。

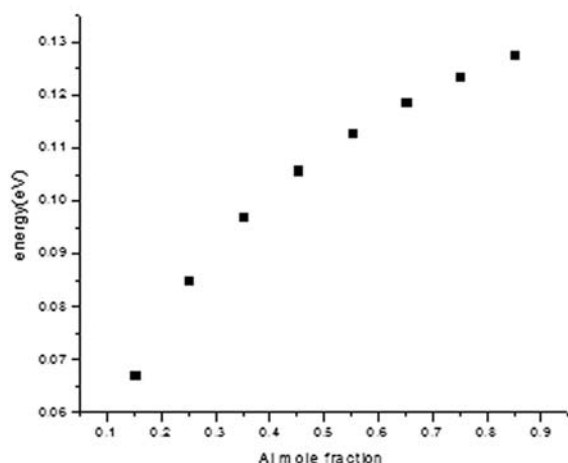


图 1 Al 组分对 AlGaAs/GaAs 探测器基态束缚能级的影响

图 1 是在室温下, 量子阱基态能级随 Al 组分变化的规律。可以看出, 随着 Al 摩尔分数在 0.15~0.85 范围内的逐渐增加, AlGaAs/GaAs 探测器的基态束缚能级逐渐上升, 也就是说, Al 组分的增加导致量子阱的势垒高度也随之增高, AlGaAs/GaAs 探测器的基态束缚能级也越远离量子阱阱底。但是 AlGaAs/GaAs 探测器的基态束缚能级远离阱底时并不像 Al 组分那样是直线增加的, 而是有所递减地增加的。

在相应阱宽分别为 5.0 nm 和 6.0 nm 的 GaAs 量子阱中, AlGaAs/GaAs 探测器的吸收光谱随 Al 组分变化的规律如图 2 和图 3 所示。

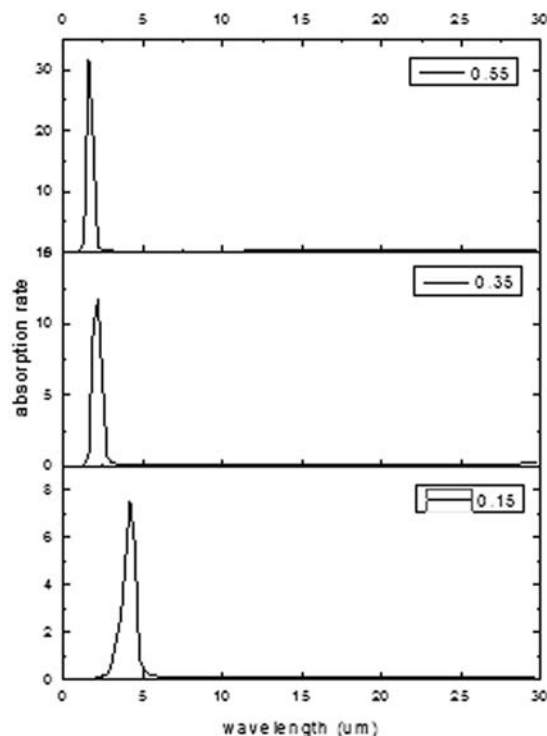


图 2 5.0 nm AlGaAs/GaAs 探测器吸收光谱随 Al 组分的变化

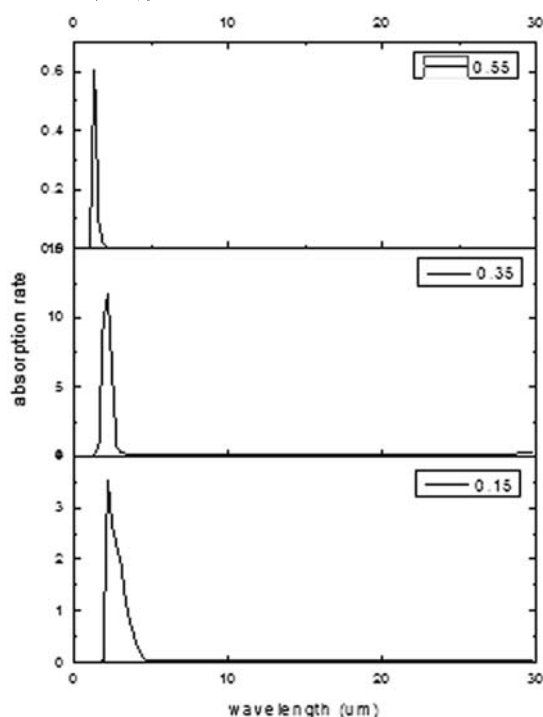


图 3 6.0 nm AlGaAs/GaAs 探测器吸收光谱随 Al 组分的变化

由图 2 和图 3 可以看出, 在同一个阱宽条件下, 随着 Al 组分的增加, AlGaAs/GaAs 量子阱

红外探测器吸收光谱峰值所对应的波长越来越短。这是因为 Al 组分的增加会导致势垒增高, 相应的基态束缚能会远离阱底, 于是吸收光谱峰值对应的光子能量越高, 与之相对应的波长也就越短。在同样的阱宽条件下, 吸收光谱的半峰宽会随 Al 组分的增加而减小, 这是因为 Al 组分的增加会导致势垒高度变大, 电子被束缚的程度变大, 波函数的延展性变差。可以想象, 当势垒的高度达到无限大时, 电子的束缚态离阱底最远, 电子被紧紧束缚在阱内, 出现在量子阱外的几率为零, 所对应的吸收谱波长更短且半峰宽最小。

从图 2 和图 3 可以很清楚地看出, 在同样的 Al 组分条件下, 随着阱宽的变小, 对应基态直接跃迁的吸收光谱越来越强。这是因为在计算中, 由于量子阱宽度很小, 整个材料的 Fermi 能级由势垒区域的费米能级决定。正如前面所提到的, 不同的阱宽所对应的势垒的掺杂均为  $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。这意味着, 对于不同的阱宽, 费米能级是确定的。但是随着量子阱阱宽的变大, 基态束缚能会更加接近阱底, 基态上的电子密度会逐渐变大, 相应地留给价带上的电子跃迁到基态的空位密度就会变小。这样就会直接导致电子从价带基态到导带基态直接的跃迁几率变小, 表现为吸收光谱的基态到基态之间跃迁的峰值较弱。所以 5 nm 量子阱的吸收光谱强度要大于 6 nm 量子阱的吸收光谱强度。但是当阱宽变窄时, 量子阱中的束缚能会逐渐接近势垒, 所对应的波函数会越来越延展, 相应地, 吸收谱的半峰宽也会越来越大。通过比较图 2 和图 3 可以看出该现象。

由图 1~3 可以看出, AlGaAs/GaAs 量子阱红外探测器的吸收光谱随 Al 组分的变化是明显的。由此, 人们可以通过调节 Al 组分来调节器件的吸收光谱以及响应波长。

## 2.2 温度对 AlGaAs/GaAs 探测器吸收光谱的影响

图 4 为 AlGaAs/GaAs 探测器吸收光谱随温度变化的规律。该探测器的阱宽为 5 nm, Al 组

分为 0.25, 垒宽为 50.0 nm, Al 的扩散长度为 0.01 nm。势垒和接触点的掺杂分别为  $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  和  $2.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。

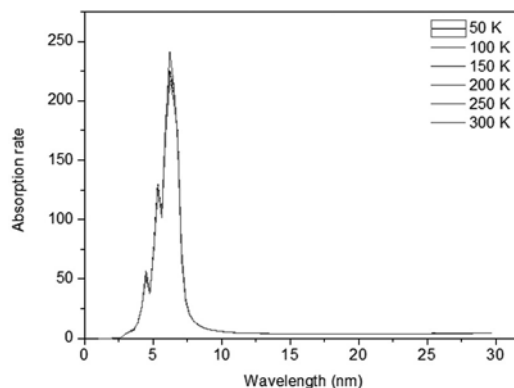


图 4 温度对 AlGaAs/GaAs 探测器吸收光谱的影响

由图 4 可以看出, 量子阱的吸收光谱峰值和强度随温度的变化不大, 这是束缚能随温度变化很小的结果。鉴于 AlGaAs/GaAs 量子阱的束缚能和吸收光谱随温度变化很小的特点, 它有良好的环境适应能力, 常被制成红外探测器和太阳能电池, 应用于太空探测中。

## 3 结论

研究了 AlGaAs/GaAs 量子阱红外探测器的基态束缚能和吸收光谱随 Al 组分、温度与阱宽变化的规律。在假定的 Al 扩散长度为 0.01 nm, 势垒和接触点的掺杂分别为  $1.0 \times 10^{15}$  和  $2.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  且垒宽为 50.0 nm 的结构中, 发现温度对 AlGaAs/GaAs 探测器吸收光谱的影响甚微, 几乎可以忽略不计。当阱宽变窄时, 量子阱的吸收光谱峰值向长波方向移动; 当 Al 组分改变时, AlGaAs/GaAs 探测器对光谱的吸收波段也会有所改变。Al 组分的摩尔浓度越高, 吸收光谱的峰值所对应的波长越小。这是因为随着 Al 组分摩尔浓度在 AlGaAs/GaAs 探测器中的增加, 基态束缚能级会逐渐上升。这意味着, 随着 Al 摩尔分数的增加, 基态束缚能就越远离阱底, 基态束缚能也就越大, 增加的大小与 Al 组分不成直线关系。通过以上数据分析, 可找到量子阱探测器工作最佳时的阱宽、Al 组分和温度, 以达到让量子阱红外探测器发挥最佳性能的目的。

要对真实的探测器的光电性质进行有效模拟, 还需要进一步考虑从束缚态跃迁到高能态的电子在外加电压或内建电场作用下能否有效地输运形成电流, 将光信号转换成电信号。这是对红外探测器进行有效优化的必不可少的一步, 也是我们下一步的工作。

### 参考文献

- [1] Rogalski A. HgCdTe Infrared Detector Material: History, Status and Outlook [J]. *Rep Prog Phys*, 2005, **68**(10): 2267–2336.
- [2] Yadava R D, Gupta A K, Warriar A. Hole Scattering Mechanisms in  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  [J]. *Electron Mater*, 1994, **23**(12): 1359–1378.
- [3] Dennis P N, Elliott C T, Jones C L. A Method for Routine Characterization of the Hole Concentration in p-type Cadmium Mercury Telluride [J]. *Infrared Phys*, 1982, **22**(3): 167–169.
- [4] Colombo L, Chang R R, Chang C J, et al. Growth of Hg-based Alloys by the Travelling Heater Method [J]. *Vac Sci Technol A*, 1988, **6**(4): 2795–2799.
- [5] DeLyon T J, Jensen J E, Gorwitz M D, et al. MBE Growth of HgCdTe on Silicon Substrates for Large-area Infrared Focal Plane Arrays: a Review of Recent Progress [J]. *Electron Mater*, 1999, **28**(6): 705–711.
- [6] Johnson S M, Buell A A, Vilela M F, et al. HgCdTe/Si Materials for Long Wavelength Infrared Detectors [J]. *Electron Mater*, 2004, **33**(6): 526–530.
- [7] Carmody M, Pasko J G, Edwall D, et al. Long Wavelength Infrared, Molecular Beam Epitaxy, HgCdTe-on-Si Diode Performance [J]. *Electron Mater*, 2004, **33**(6): 531–537.
- [8] Smith J S, Chiu L C, Margalit S, et al. A New Infrared Detector Using Electron Emission from Multiple Quantum Wells [J]. *J Vac Sci Technol B*, 1983, **1**(2): 376–378.
- [9] 官文标, 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): 811–812.
- [10] 马宏, 易新建, 金锦炎, 等. MOVPE 生长  $1.3\mu\text{m}$  无致冷  $\text{AlGaInAs/InP}$  应变补偿量子阱激光器研究 [J]. *中国激光*, 2002, **29**(3): 193–196.
- [11] 陈国鹰, 马祖光, 王新桥. 高功率梯度折射率分别限制异质结构  $\text{InGaAs/AlGaAs}$  应变双量子阱激光器 [J]. *光学学报*, 1999, **19**(8): 1084–1088.
- [12] 李树强, 陈江华, 于复生, 等.  $980\text{ nm}$  应变单量子阱的理论设计 [J]. *中国激光*, 2000, **27**(8): 682–686.
- [13] Xie H, Katz J, Wang W I. Infrared Absorption Enhancement in Light- and Heavy-hole Inverted  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As/Al}_{1-y}\text{In}_y\text{As}$  Quantum Wells [J]. *Appl Phys Lett*, 1991, **59**(27): 3601–3603.
- [14] Wang Y H, Li S S, Chu J, et al. Ultralow Dark Current p-type Strained-layer  $\text{InGaAs/InAlAs}$  Quantum Well Infrared Photodetector with Background Limited Performance for  $T \leq 100\text{ K}$  [J]. *Appl Phys Lett*, 1994, **64**(6): 727–729.
- [15] 李宁, 李娜, 陆卫, 等.  $64 \times 64$  元  $\text{GaAs/AlGaAs}$  多量子阱长波红外焦平面研制 [J]. *红外与毫米波学报*, 1999, **18**(6): 427–430.
- [16] 李献杰, 刘英斌, 冯震, 等. 基于 MOCVD 技术的长波  $\text{AlGaAs/GaAs}$  量子阱红外焦平面探测器 [J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(4): 435–438.
- [17] 赵永林, 李献杰, 蔡道民, 等.  $\text{AlGaAs/GaAs}$  多量子阱红外探测器暗电流特性 [J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(5): 68–71.

### 新闻动态 News

## 比利时 Xenics 公司研制 Proba-V 卫星载 $\text{InGaAs}$ 短波红外探测器

据 [www.xenics.com](http://www.xenics.com) 网站报道, 2013 年 5 月 7 日, 比利时 Xenics 公司研制的 Xlin-1.7-3000 型  $\text{InGaAs}$  短波红外探测器搭载欧洲空间局 (ESA) 的 Proba-V 卫星发射升空。

Xlin-1.7-3000 型红外探测器是一种利用  $\text{InGaAs}$  技术制造的分辨率超过 3000 像素的行扫描探测器。这是市面上能买到的同类产品所能达

到的最高性能水平。由于在短波红外波段 ( $0.9 \sim 1.7\mu\text{m}$ ) 具有高灵敏度, 这种探测器非常适用于轨道高度为  $880\text{ km}$  的 Proba-V 卫星任务, 以便为人们长期提供关于地球上农作物与植被的变化情况以及其他供保护生物圈参考的重要参数的详细信息。

Xlin-1.7-3000 型红外探测器由 3 个独立的具有  $1024$  个像元 ( $25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$ ) 的  $\text{InGaAs}$  子阵列构成。该探测器可以在短波红外波段提供颇具价值的刈幅宽度为  $2200\text{ km}$ 、中心分辨率为  $100\text{ m}$  的地球环境信息。

□ 岳桢千