

# 单轴应力对量子阱红外探测器吸收波长的影响

张家鑫 许丽萍 温廷敦 王忠斌

(中北大学理学院物理系, 山西 太原 030051)

**摘要** 以单轴应力作用下超晶格量子阱应变能带理论为基础, 采用电子反射与干涉方法, 研究了单轴应力对超晶格能带的影响, 推导了单轴应力与超晶格导带子能级的定量关系。以 GaAs-AlGaAs-GaAs 为例, 具体计算了导带中子能级对应力的依赖关系, 进而给出了单轴应力对  $n$  型 AlGaAs-GaAs 量子阱红外探测器(QWIP)吸收波长的影响。计算结果表明, 随着单轴压应力的增大, 量子阱红外探测器的吸收波长表现出较明显的变化。当单轴压力增大到 1.3 GPa, 量子阱红外探测器的吸收峰值移动了将近 1.1  $\mu\text{m}$ , 并且基本与应力呈线性关系。量子阱红外探测器吸收波长连续可调范围 5.57~4.46  $\mu\text{m}$ 。

**关键词** 探测器; 量子阱红外探测器; 电子反射与干涉模型; 单轴应力; 吸收波长; 应变

中图分类号 TN211 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.1104001

## Dependence of the Quantum Well Infrared Photodetector Absorption Wavelength on Uniaxial Stress

Zhang Jiaxin Xu Liping Wen Tingdun Wang Zhongbin

(Department of Physics, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China)

**Abstract** The dependence of the bandgaps of strained superlattice and quantum wells on uniaxial stress is studied, by using of the method of electron reflection and interference. The quantitative relation between the stress and the energy levels of GaAs-AlGaAs superlattice and quantum wells is obtained. Furthermore, the dependence of the energy levels in conduction band on uniaxial stress is calculated for GaAs-AlGaAs-GaAs. Then the dependence of absorption wavelength on the uniaxial stress is given in a quantum well infrared photodetector (QWIP). The results show that the absorption peak moves nearly 1.1  $\mu\text{m}$  when the stress is increased to 1.3 GPa and the change with stress is basically linear. The peak of absorption wavelength can be tuned from 5.57  $\mu\text{m}$  to 4.46  $\mu\text{m}$  continuously in QWIP.

**Key words** detectors; quantum well infrared photodetector; model of electron reflection and interference; uniaxial stress; absorption wavelength; strain

**OCIS codes** 040.4200; 040.3060; 040.5160

## 1 引 言

自 1983 年 Smith 等<sup>[1]</sup>首次研制出量子阱红外探测器(QWIP)以来, 由于其具有响应速度快, 探测率与 HgCdTe 探测器相近, 生长工艺成熟, 材料大面积均匀, 并且探测波长可调等优点, 量子阱红外探测器成为人们研究的热点<sup>[2]</sup>。近年来, 应变量子阱光电器件已成为人们研究的热点, 其中研究较多的是应变量子阱激光器<sup>[3~5]</sup>和 QWIP 两个方面。1991

年 Xie 等<sup>[6]</sup>为了解决 QWIP 载流子有效质量大导致较小的吸收系数从而影响 QWIP 响应度的问题, 提出了以应变来使重、轻空穴态反转, 以轻空穴为基态, 能有效增强子带跃迁的光吸收系数。1993 年 Wang 等<sup>[7]</sup>使用 P 型 QWIP, 通过在 InGaAs 中引入应力, 实现了降低 QWIP 的暗电流, 同时增强了光吸收, 进一步提高了 QWIP 的性能。最近有人对单轴应力下 GaAs 的光致光谱特性进行了实验研究,

收稿日期: 2011-04-06; 收到修改稿日期: 2010-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(60776062, 50730009)资助课题。

作者简介: 张家鑫(1982—), 男, 硕士研究生, 主要从事介观光电方面的研究。E-mail: zjxinqushida@sina.com

导师简介: 许丽萍(1958—), 女, 博士, 教授, 主要从事纳米功能材料及应用等方面的研究。E-mail: lpxu@sina.com

(通信联系人)

发现随着应力的增大,谱峰出现蓝移,GaAs 发生弹性形变单轴应力最大可达 1.3 GPa<sup>[8]</sup>。

本文以单轴应力作用下超晶格量子阱应变理论为基础,采用超晶格量子阱电子反射与干涉方法,理论上研究了沿量子阱生长方向的单轴应力对 AlGaAs-GaAs QWIP 吸收峰值的影响。

## 2 基本理论

### 2.1 超晶格量子阱反射与干涉电子态理论<sup>[9]</sup>

GaAs/AlGaAs 超晶格多量子阱能带结构如图 1 所示。

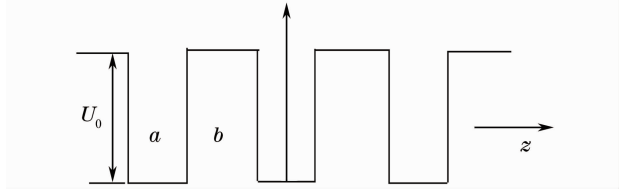


图 1 GaAs-AlGaAs 多量子阱导带势能分布  
Fig. 1 Potential energy of GaAs-AlGaAs multiple quantum well conduction band

图中  $a$  为超晶格的阱宽,  $b$  为垒宽, 垒高为  $U_0$ , 阱中电子有效质量为  $m_a$ , 垒中的电子有效质量为  $m_b$ , 电子波函数:  $\psi(z) = u(z)\exp(ikz)$ , 周期晶格函数  $u(z) = u(z + nd)$ ,  $n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ ,  $d = a + b$ ,  $k$  是电子在  $z$  方向的波矢。

沿  $z$  方向的薛定谔方程为

$$-\frac{\hbar^2}{2m_a} \frac{d^2\psi}{dz^2} = E\psi, \quad -\frac{a}{2} + nd < z < \frac{a}{2} + nd \quad (1)$$

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m_b} \frac{d^2}{dz^2} + U_0\right)\psi = E\psi$$

$$(n-1)d + \frac{a}{2} < z < nd - \frac{a}{2}. \quad (2)$$

令  $K_a = \left(\frac{2m_a E}{\hbar^2}\right)^{1/2}$ ,  $K_b = \left[\frac{2m_b(E-U_0)}{\hbar^2}\right]^{1/2}$ , 对  $E > U_0$  时, 方程的解为

$$\psi_a(z) = A\exp(iK_a z) + A'\exp(-iK_a z), \quad (3)$$

$$\psi_b(z) = B\exp(iK_b z) + B'\exp(-iK_b z), \quad (4)$$

式中  $\psi_a(z)$ ,  $\psi_b(z)$  分别为在阱层和垒层传播的平面电子波, 第一项表示电子波沿  $z$  方向传播, 第二项表示电子波沿  $-z$  方向传播。根据反射与干涉方法得到以下三种导带子能级:

1) 电子波对势阱的穿透率达到极大值对应的电子能级为

$$E^{(n)} = \frac{\hbar^2 K_a^2}{2m_a} = \frac{\hbar^2}{2m_a} \left(\frac{\pi}{a}\right)^2 n^2, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

2) 电子波对阱层的透射率最小对应的电子能

级为

$$E^{(n)} = \frac{\hbar^2 K_a^2}{2m_a} = \frac{\hbar^2}{2m_a} \left(\frac{\pi}{a}\right)^2 \left(n + \frac{1}{2}\right)^2, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

3) 电子波对垒层的透射率为极大值对应的电子能级为

$$E^n = U_0 + \frac{\hbar^2 K_b^2}{2m_b} = U_0 + \frac{\hbar^2}{2m_b} \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 n^2, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

### 2.2 单轴应力与应变的关系

在弹性形变范围内, 固体沿某个方向进行拉伸或压缩, 产生这种形变的力叫做单轴应力。应变与应力的关系可以用胡克定理表示, 当单轴应力沿超晶格生长方向时, 则应变分量为<sup>[10]</sup>

$$\epsilon_{//} = \epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = -S_{12} T > 0, \quad (8)$$

$$\epsilon_{\perp} = \epsilon_{zz} = -S_{11} T < 0, \quad (9)$$

$$\epsilon_{xy} = \epsilon_{yz} = \epsilon_{zx} = 0, \quad (10)$$

式中  $T$  是应力的大小;  $S_{ij}$  是材料的弹性顺应常数, 它与弹性模量  $C_{ij}$  之间的关系为<sup>[11]</sup>

$$S_{11} = \frac{c_{11} + c_{12}}{(2c_{12} + c_{11})(c_{11} - c_{12})}, \quad (11)$$

$$S_{12} = \frac{-c_{12}}{(2c_{12} + c_{11})(c_{11} - c_{12})}. \quad (12)$$

GaAs-AlGaAs-GaAs 量子阱生长方向上应力与应变的关系式为

$$\epsilon_{\perp} = -0.0117 \times 10^{-9} T. \quad (13)$$

### 2.3 单轴应变与能带的关系

当晶体受到单轴压应变时, 除了纵向被压缩外, 同时晶体的对称性被破坏, 进而使导带与价带的带宽发生改变, 导带边随单轴应变的变化关系为<sup>[12]</sup>

$$\delta E_c = a_c(\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) = 2a_c \left(1 - \frac{c_{12}}{c_{11}}\right) \epsilon_{//}, \quad (14)$$

$$\epsilon_{\perp} = \epsilon_{zz} = -\frac{2c_{12}}{c_{11}} \epsilon_{//}, \quad (15)$$

式中  $a_c$  为导带的静压力形变势。

根据以上分析, 单轴压应力会使 QWIP 的垒宽, 阱宽会变小, 同时势垒的高度也会改变, 最终导致导带子能级的改变, 导带子能级的改变进一步导致 QWIP 的吸收波长的改变。

量子阱红外探测器的探测峰值波长  $\lambda$  可表示为<sup>[9]</sup>

$$\lambda = hc/\Delta E, \quad (16)$$

式中  $h$  为普朗克常量,  $c$  为光速,  $\Delta E$  是发生光吸收跃迁的两个能级之间的能量差, 计算中的参数如表 1 所示<sup>[11,13]</sup>。

表 1 计算用到的参数

Table 1 Relevant parameters used in the calculations

Material	$C_{11}/(10^{10} \text{ Pa})$	$C_{12}/(10^{10} \text{ Pa})$	$a_c/\text{eV}$
AlAs	12.50	5.34	-5.64
GaAs	11.88	5.38	-7.17

### 3 计算结果与分析

$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  阱宽  $a=4.8 \text{ nm}$ , 垒宽  $b=10 \text{ nm}$ , GaAs 中电子的有效质量  $m_a=0.067m_0$ , AlGaAs 中电子的有效质量  $m_b=(0.067+0.083x)m_0$ ,  $m_0$  为自由电子质量,  $U_0=0.65\Delta E_g=0.243 \text{ eV}$   $x=0.3$ ,  $\Delta E_g=1.247x$ , 掺杂浓度  $n_0=1\times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。

通过计算可以得到以下 3 个能级的电子能:  $E^{(0)}=0.061 \text{ eV}$ ,  $E^{(1)}=0.244 \text{ eV}$ ,  $E^1=0.284 \text{ eV}$ , 如图 2 所示。

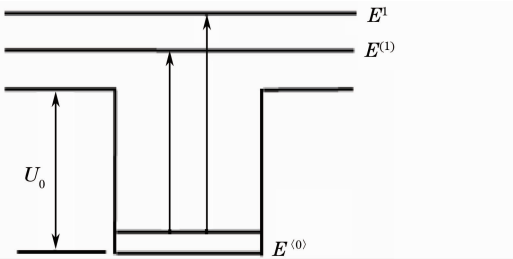

 图 2 能级  $E^{(0)}$ ,  $E^{(1)}$ ,  $E^1$  之间的跃迁图

 Fig. 2 Transition between the energy levels  $E^{(0)}$ ,  $E^{(1)}$  and  $E^1$ 

本文研究了基态  $E^{(0)}$  分别与第一激发态  $E^{(1)}$  和第二激发态  $E^1$  之间吸收峰值与单轴压力之间的关系, 分别如图 3, 图 4 所示。

可以看出, 在单轴应力的作用下, AlGaAs-GaAs 量子阱红外探测器吸收波长与应力有密切的关系。随着应力的增大,  $E^{(0)}$  与  $E^{(1)}$  吸收波长峰值减小, 当应力增大到  $1.3 \text{ GPa}$  时, 吸收峰值从  $6.78 \mu\text{m}$  减小到  $6.56 \mu\text{m}$ , 并且几乎成线性减小, 如图 3 所示;  $E^{(0)}$  与

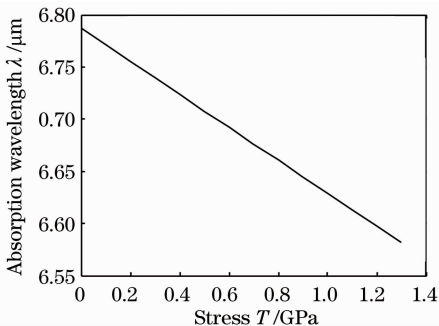

 图 3  $E^{(1)}$  与  $E^{(0)}$  能级之间吸收波长与应力的关系

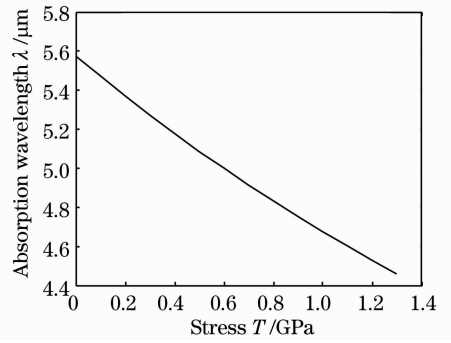
 Fig. 3 Dependence of absorption wavelength on stress from  $E^{(0)}$  to  $E^{(1)}$ 

 图 4  $E^{(0)}$  与  $E^1$  能级之间吸收波长与应力的关系

 Fig. 4 Dependence of absorption wavelength on stress from  $E^{(0)}$  to  $E^1$ 

$E^1$  能级之间吸收波长峰值随应力的增大减小较为显著, 在  $5.57\sim 4.46 \mu\text{m}$  间, 如图 4 所示。

随着压力的增大, QWIP 的吸收峰值会发生变化,  $E^{(0)}$  与  $E^1$  能级之间吸收峰值和  $E^{(0)}$  与  $E^{(1)}$  之间吸收波长峰值都出现蓝移。这样, 通过施加压力, QWIP 的吸收峰值发生连续地变化, 导致 QWIP 探测到的波段发生变化, 从而可以扩大 QWIP 的探测范围。基于以上的计算结果与讨论, 在原有 QWIP 的基础上可以增加一个加压装置<sup>[5]</sup>, 如图 5 所示, 可设计一种吸收峰值可以连续改变的 QWIP, 从而可以通过加压力来改变吸收峰值, 进而扩大 QWIP 探测范围。

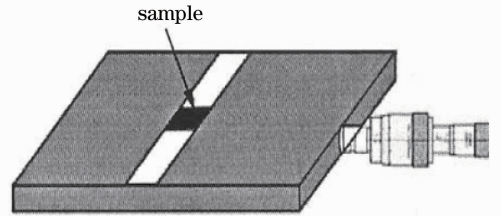


图 5 施加应力装置

Fig. 5 Stress-inducing device

### 4 结 论

以单轴应力作用下超晶格量子阱应变理论为基础, 采用超晶格量子阱电子反射与干涉方法, 研究了 AlGaAs-GaAs 超晶格量子阱导带子能级与应变的关系, 以及 AlGaAs-GaAs QWIP 吸收波长与应力的关系。计算结果表明, 在单轴应力的作用下, AlGaAs-GaAs 量子阱红外探测器吸收波长将发生很明显的连续变化, 扩大了 QWIP 的吸收峰的宽度及探测范围。本文的研究结果可为量子阱红外探测器的研究与设计提供一定的理论参考。

## 参 考 文 献

- 1 J. S. Smith, L. C. Chiu, S. Margalit *et al.*. A new infrared detector using electron emission from multiple quantum wells[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 1983, **1**(2): 376~378
- 2 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): 811~812  
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): 811~812
- 3 Ma Hong, Yi Xinjian, Jin Jinyan *et al.*. Study on MOVPE growth of 1.3  $\mu\text{m}$  uncooled AlGaInAs/InP strain compensated quantum well lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(3): 193~196  
马宏, 易新建, 金锦炎等. MOVPE生长1.3  $\mu\text{m}$  无致冷 AlGaInAs/InP 应变补偿量子阱激光器研究[J]. *中国激光*, 2002, **29**(3): 193~196
- 4 Chen Guoying, Ma Zuguang, Wang Xinqiao. Strained InGaAs/AlGaAs double quantum well laser with GRIN-SCH[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(8): 1084~1088  
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 InGaAs/AlGaAs 应变双量子阱激光器[J]. *光学学报*, 1999, **19**(8): 1084~1088
- 5 Li Shuqiang, Chen Jianghua, Yu Fusheng *et al.*. Theoretical design method of 980 nm strained single quantum well [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **27**(8): 682~686  
李树强, 陈江华, 于复生等. 980 nm 应变单量子阱的理论设计[J]. *中国激光*, 2000, **27**(8): 682~686
- 6 H. Xie, J. Katz, W. I. Wang. Infrared absorption enhancement in light-and heavy-hole inverted  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}/\text{Al}_{1-y}\text{In}_y\text{As}$  quantum wells[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(27): 3601~3603
- 7 Y. H. Wang, S. S. Li, J. Chu *et al.*. Ultralow dark current P-type strained-layer in GaAs/InAlAs quantum well infrared photodetector with background limited performance for  $T \leq 100$  K [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(6): 727~729
- 8 Li Shusheng, Xiong Jijun, Zhang Wendong. Study on photoluminescence test for GaAs layers under external uniaxial stress[J]. *J. Test and Measurement Technology*, 2006, **20**(5): 435~438  
李树盛, 熊继军, 张文东. GaAs 结构在单轴加压下的光致发光特性测试[J]. *测试技术学报*, 2006, **20**(5): 435~438
- 9 Cheng Xingkui, Zhou Junming, Huang Qi. Interference and reflectance of electron wave at interfaces between the wells and the barriers in superlattice [J]. *Science in China (Series A)*, 2001, **31**(11): 1026~1031  
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
- 10 Xiao Dingquan, Wang Min. Crystals Physics [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2005. 35~38  
肖定全, 王民. 晶体物理学 [M]. 成都: 四川大学出版社, 2005. 35~38
- 11 S. Adachi. Properties of Aluminium Gallium Arsenide [M]. Inspec. London, 1993, 20
- 12 Gao Shaowen, Chen Yiqiao, Li Aizhen. Calculation of band structure of  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}/\text{GaInAsP}$  strained quantum wells [J]. *J. Functional Materials and Devices*, 2002, **8**(3): 218~222  
高少文, 陈意桥, 李爱珍.  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}/\text{GaInAsP}$  应变量子阱结构能带的计算 [J]. *功能材料与器件学报*, 2002, **8**(3): 218~222
- 13 Xin Guofeng, Chen Guoying, Hua Jizheng *et al.*. Wavelength desing for the 941 nm high output power strained single-quantum-well semiconductor lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(5): 1293~1298  
辛国锋, 陈国鹰, 花吉珍等. 941 nm 大功率应变单量子阱激光器的波长设计[J]. *物理学报*, 2004, **53**(5): 1293~1298

栏目编辑: 韩峰