

# SiGe/Si 多量子阱中垂直方向 红外吸收及共振色散效应\*

吴 兰

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江, 杭州, 310027)

**摘 要** 用垂直入射的中红外光束调制非掺杂 SiGe/Si 量子阱中光致子带间吸收, 氩离子激光器作为子带间跃迁的光泵浦源在阱中产生载流子, 红外调制光谱用步进式傅立叶变换光谱仪记录. 实验中观察到明显的层间干涉效应及与子带间跃迁有关的色散效应. 理论和实验分析认为样品折射率变化造成的位相调制可以补偿吸收所造成的幅度调制.

**关键词** 硅锗多量子阱, 垂直方向子带间吸收, 色散效应.

## INFRARED ABSORPTION AT NORMAL INCIDENCE AND RESONANT DISPERSION EFFECT IN THE SiGe/Si MULTIPLE QUANTUM WELL \*

WU Lan

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation,  
Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** Modulation of mid-infrared beam by photo-induced intersubband absorption in undoped SiGe/Si quantum wells was investigated at normal incidence. An Ar<sup>+</sup> laser is used as optical pumping of interband transitions to photocreate carriers in the wells. The modulated transmission of the sample was measured by a step-scan Fourier transform spectroscopy. Resonant dispersion associated with intersubband transitions and multiple reflections effect in the multi-quantum wells were clearly evidenced. Theoretical and experimental results show that the phase modulation due to refractive index variations may compensate for amplitude modulation due to absorption.

**Key words** SiGe multi-quantum wells, normal incidence intersubband absorption, dispersion effect.

### 引言

入射红外光的偏振方向必须与量子阱生长方向一致, 是子带间光致吸收的选择定则. 但是垂直方向的子带间吸收已经在 Si/SiGe 量子阱的价带<sup>[1]</sup>和 AlGaAs/GaAs 量子阱中观察到<sup>[2]</sup>. 这是由于价带或导带不同子带之间的耦合, 使得选择定则不再适用. 已制造出基于子带耦合的垂直入射红外光探测器<sup>[3]</sup>. 这种器件不需要在接受面光栅刻蚀就能使入射红外光与量子阱有效耦合, 但是, 我们必须注意

到, 在多量子阱 (multi-quantum wells, 简称 MQW) 中, 子带间的共振吸收伴随着色散效应. 伴随子带间吸收的反常色散效应曾经在 III-V 族量子阱中被观察到<sup>[4]</sup>. 为使 Si/SiGe 多量子阱将来在中红外波长的全光相位调制器件等方面的应用, 必须对其中的色散效应进行研究.

本文研究了 Si/SiGe 多量子阱中垂直方向的光致子带间吸收的中红外光调制, 用光泵浦在量子阱子带间产生光致载流子, 子带间的调制吸收是用步进式傅立叶变换仪测量的. 实验中观察到明显的子

\* 国家教育部留学回国人员科研启动基金资助项目  
稿件收到日期 2001-04-02, 修改稿收到日期 2001-07-30

\* The project supported by the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars, State Education Ministry of China  
Received 2001-04-02, revised 2001-07-30

带间跃迁吸收及 MQW 膜层间多次反射引起的色散效应,我们分析并建立了考虑到多次反射效应、自由载流子和子带间跃迁引起的幅度和位相调制的数学模型,该模型与实验结果符合得相当好.

## 1 实验原理与装置

本文所用的样品,是采用超高真空化学气相沉积法,在硅衬底上生长的由 SiGe 和 Si 交替排列组成的量子阱,样品含锗 30%, 3nm 厚的 SiGe 量子阱由 18nm 宽的 Si 势垒隔开,有 50 个周期. 为了观察量子阱中的子带间吸收 (intersubband absorption), 基础子能级必须被充满. 这通常是由量子阱生长过程中其结构的杂质掺杂而获得. 对于未掺杂的量子阱,可用光致子带间吸收<sup>[5]</sup> (photo-induced intersubband absorption, 简称 PIA) 技术. 能带间的光泵浦在价带和导带上产生电子-空穴对, 部分载流子被阱捕获. 由于子能带之内和子能带之间的弛豫时间 (约 ps 量级) 与能带之间的复合时间 (约  $\mu$ s 量级) 有显著的差别, 光致载流子就积累在导带和价带的基础子能带上. 如此时有一束红外光射入, 就可以激发从基础子能带出发的子能带之间的吸收.

实验中,用一台氩离子激光器作的光泵浦源产生光致载流子,样品放置在步进式傅立叶红外光谱变换仪 (Fourier Transform Infra-Red, 简称 FTIR) 系统中. 激光束由一个高频机械开关调制, 高频调制信号由 MCT (Mercury-Cadmium-Telluride) 探测器接收, 经锁相放大器调制后再进行傅立叶变换. 用这种方法, 我们可以探测到约  $10^{-4}$  量级的微弱吸收. 样品的侧面被抛光成  $45^\circ$  角以形成光波导. 红外光由广谱光源 (Glowbar) 发出, 经偏振光片偏振后, 以偏振方向垂直生长轴方向 (TM 偏振), 或以平行生长轴方向 (TE 偏振) 入射样品一个侧面, 经过几次全反射, 再从另一个侧面射出. 样品做成波导形式, 既放大了吸收效应, 又使得红外光束在偏振方向可调. 实验中样品被置于液氮制冷杜瓦瓶中以维持 77K 的低温.

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 TE 偏振方向的红外吸收

SiGe/Si 量子阱中的红外光致吸收, 从机理上可分为自由载流子吸收和价带的子带间吸收. 在导带中的自由载流子吸收, 是导带中同一能带的电子在声子或杂质的协助下进行间接跃迁, 几率较小. 而在价带中有 3 个相距很近的能带: HH, LH 和 SO. 自

由载流子在这 3 个能带之间的跃迁是直接跃迁, 几率比间接跃迁大得多. 在我们的 SiGe/Si 量子阱中, 自由载流子吸收是非常显著的, 它的强度和波长平方成正比, 单调增长并且没有峰值<sup>[6]</sup>.

图 2(a) 是样品的光致子带吸收光谱. 红外光是经过一个偏振片变为 TE 偏振 (入射光电场垂直于 MQW 生长轴) 后被样品吸收的. 从图 2(a) 中可以看出, 吸收谱是由两个吸收峰叠加在一个单调增长的自由载流子吸收曲线上而成的. 通过对量子阱价带中的能级结构进行计算, 发现低能量处 (约 140meV) 的吸收峰主要是 HH<sub>1</sub>-HH<sub>2</sub> 及 HH<sub>1</sub>-LH<sub>2</sub> 之间的跃迁引起的, 而高能量处 (约 230meV) 的吸收峰主要是 HH<sub>1</sub>-LH<sub>3</sub> 及 HH<sub>1</sub>-SO<sub>1</sub> 之间的跃迁引起的. 由于能级间跃迁的多种可能性, 吸收峰被大大拓宽了. 另外我们发现在约 140meV 处有一个显著的非连续变化, 原因是样品表面会自然钝化而形成一层氧化膜, 140meV 正是 SiO<sub>2</sub> 的吸收峰. 在光泵浦下我们同时也调制了 Si/SiO<sub>2</sub> 表面聚集的载流子浓度引起的吸收.

由图 2 可见, 在样品中观察到明显的 TE 偏振光致子带间吸收. 虽然吸收率会降低一些, 以我们实验装置的分辨率, 同样的实验应该也能在垂直入射的情况下进行. 在图 1 的实验装置中, 将样品的 MQW 面向红外光垂直放置, 泵浦光呈  $45^\circ$  角入射, 实验结果如图 2b 所示. 可以看出, 虽然同样是 TE 偏振的红外光, 但吸收谱线和前面的波导结构吸收谱却有着明显的不同. 由 MQW 结构中的多次反射引起的周期性起伏可在吸收谱的高能量部分清楚看到. 由多次反射原理推导出起伏周期的计算公式  $\Delta E = 1/(2nL)$ , 式中  $n$  是 MQW 结构的平均折射率,  $L$  是 MQW 结构的总厚度. 用  $n_{\text{SiGe}} = 3.70$ ,  $n_{\text{Si}} = 3.50$ ,  $L_{\text{SiGe}} = 50 \times 30 \text{ \AA}$ ,  $L_{\text{Si}} = 50 \times 180 \text{ \AA}$  代入, 得

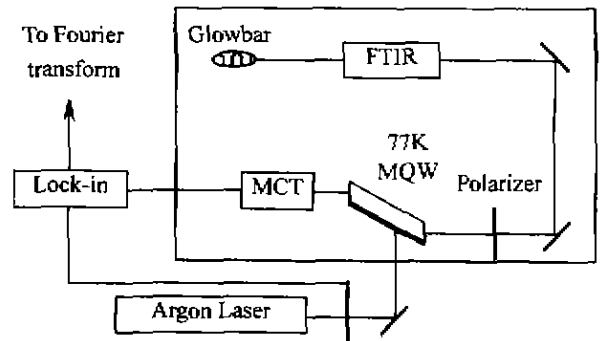


图 1 实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

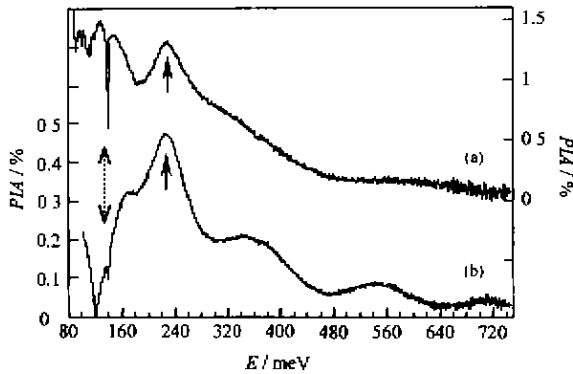


图 2 (a) TE 偏振的红外光通过一个 3nm 的  $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$  MQW 波导后得到的 PIA 光谱 (b) 红外光垂直入射一个 3nm 的  $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$  MQW 样品后得到的 PIA 光谱  
Fig. 2 (a) Photo-induced intersubband absorption measured in a 3nm  $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$  MQW waveguide geometry with infrared beam in TE polarization (b) Normal incidence photo-induced intersubband absorption measured in a 3nm  $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$  MQW sample

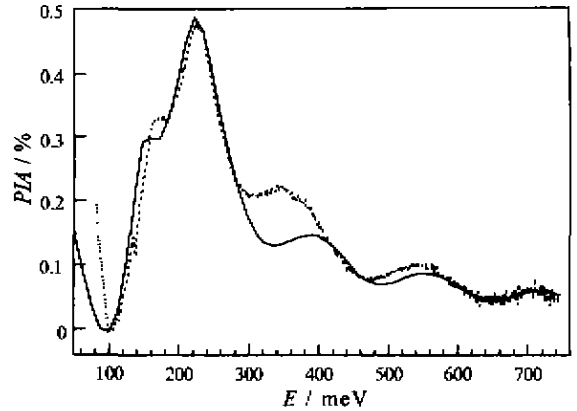


图 3 虚线为红外光垂直入射一个 3 nm 的  $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$  MQW 样品后得到的 PIA 光谱, 实线为作者用 Drude 计算模型的模拟结果

Fig. 3 Infrared normal incidence photo-induced intersubband absorption in a 3nm  $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$  MQW sample (dotted curve) and the result simulated by Drude model (solid curve)

到  $\Delta E = 167\text{meV}$ , 与图中测得的  $171\text{meV}$  相去不远. 因为计算是用的平均厚度, 而我们对这个样品做的光致荧光谱表明, 其 MQW 结构中的量子阱厚度是略有差异的. 另外, 我们发现高能量处的子带间吸收仍然很明显, 但低能量处的子带间吸收几乎消失了 (见图 2 中箭头). 由于折射率调制效应的周期性起伏的影响, 吸收峰值向低能量方向偏移了约  $5\text{meV}$ .

## 2.2 运用 Drude 模型的计算模拟

理论分析和实验结果都清楚表明, 垂直入射的红外吸收谱是由吸收(子带间吸收及自由载流子吸收)和折射率调制效应共同决定的. 在折射率调制效应的计算中, 把 MQW 结构看作是一个小型 Fabry-Perot 腔, 在每一个 Si 层或 SiGe 层其折射率是均匀的. 在光泵浦下, 整个 MQW 结构中产生了光致载流子. 由于价带的带偏置, 其中大部分被 SiGe 层所捕获. 用自由载流子运动的一个经典性模型, 即 Drude 模型, 来处理自由载流子吸收和载流子所引起的折射率位相变化. 对半导体而言, 这里的折射率当然是指复折射率. 而子带间吸收用在高、低能量处的两个 Lorentzian 峰形来模拟, 由图 2(a) 推出其中心位置在  $140\text{meV}$  和  $230\text{meV}$ , 半宽度分别为  $35\text{meV}$  和  $45\text{meV}$ . 计算模拟结果如图 3 实线所示, 与虚线所示的实验结果图 2(b) 大致符合. 误差最大的地方在约  $350\text{meV}$  处, 这是由于在 TE 偏振的情况下, 能级间跃迁具有多种可能性, 故吸收峰不能完全用 Lorentzian 峰形来模拟结果.

在大约  $100\text{meV}$  处, 有一个吸收率的突变. 这里恰巧是周期性起伏的谷底处, 由于受到  $130\text{meV}$  处子带间吸收的影响, 使得谷底比别处更加明显. 模拟计算可以说明这一点. 必须注意, 自由载流子吸收和光致载流子吸收都会引起折射率位相变化(分别用  $N_{ib}$  和  $N_{i,cb}$  来表示). 实验所测的吸收谱的折射率调制效应是由这两个变化共同引起的. 如果在上文的拟合计算中(图 4 实线)不考虑  $\Delta N_{i,cb}$ , 结果如图 4 虚线所示. 可以发现, 不考虑  $\Delta N_{i,cb}$  后  $100\text{meV}$  处的突变就不太明显了. 从实验装置中的数字式锁相放大器的读数发现, 位相经过零跳变, 速度很快, 使得锁相放大器来不及反应. 这也是模拟结果和实验数据不太符合的原因之一.

## 3 结论

我们展示了红外光垂直入射条件下, 在 Si(100) 基底上生长的非掺杂 SiGe/Si 多量子阱的 PIA 光谱, 与 TE 偏振红外光通过波导结构的 SiGe/Si 多量子阱后的 PIA 光谱相比, 前者呈现明显的多层膜干涉效应及和子带间跃迁有关的色散效应. 并发现吸收引起的折射率变化造成的位相调制可以补偿吸收所造成的幅度调制. 垂直入射红外调制光谱依赖于自由载流子吸收、子带间吸收及与这两个吸收相连的色散效应. 此种光现象为制造垂直入射条件下的光探测器提供了理论与实验基础.

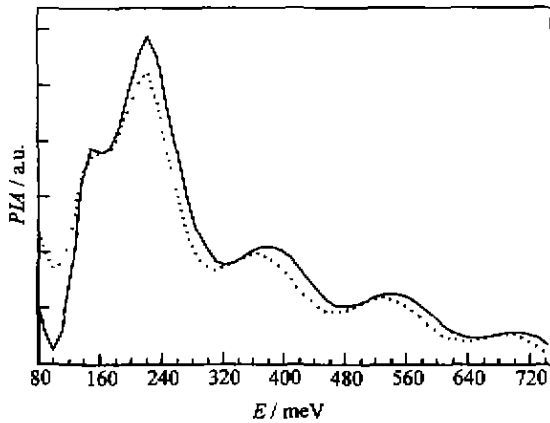


图4 实线为对 TE 偏振的红外光垂直入射一个 3nm 的  $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$  MQW 样品后得到的光致子带吸收谱的 Drude 模型的计算模拟结果(即图 3 实线). 如果不考虑子带间吸收引起的折射率变化, 计算结果如虚线所示

Fig. 4 The solid curve shows with normal incidence of infrared beam in TE polarization photo-induced intersubband absorption in a 3nm  $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$  MQW simulated by Drude Model (i. e. the solid curve in Fig. 3). The dotted curves show the result under the same condition except the index variation due to intersubband absorption was not taken into

account

## REFERENCES

- [1] Park J S, Karunasiri P R G, Wang K L. Intervalence-subband transition in SiGe/Si multiple quantum wells-normal incidence detection. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**: 681
- [2] Levine B F, Gunapala S D, Kuo J M, *et al.* Normal incidence hole intersubband absorption long wavelength GaAs/AlxGa<sub>1-x</sub>As quantum well infrared photodetectors. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**: 1864
- [3] People R, Bean J C, Sputz S K, *et al.* Normal incidence hole in quantum well infrared photodetectors in pseudomorphic Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/Si. *Thin Solid Films*, 1992, **222**: 2720
- [4] Almogy G, Shakouri A, Yariv A. Observation of birefringence induced by intersubband transitions in quantum well's. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **63**: 2720
- [5] Yang D D, Julien F H, Lourtioz J M, *et al.* First demonstration of room-temperature intersubband-interband double-resonance spectroscopy of GaAs/AlGaAs quantum wells. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, **26**: 398
- [6] WU Lan. A study of photo-induced intersubband absorption in the SiGe/Si multiple quantum wells. *Acta Photonica Sinica* (吴兰. SiGe/Si 量子阱中的光致子带间吸收研究. *光子学报*). 2001, **30**: 704