

# $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 应变层超晶格光伏特性研究\*

朱文章 刘士毅

(厦门大学物理系, 福建, 厦门, 361005)

**摘要:** 采用电容耦合法测量了  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  应变层超晶格在不同温度下的光伏特性. 在II型能带排列的样品中观测到价带-导带子带和价带子带-导带光跃迁的4个峰. 对所有样品测得的光伏截止波长都比理论预期值小. 还对光电压随温度的变化作了初步解释.

**关键词:** 光伏效应, 应变层超晶格  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ , 带间光跃迁.

## 引言

近年来, 随着 Si 分子束外延技术的进展, 制备高质量的  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  应变层超晶格已成为可能.  $\text{GeSi}/\text{Si}$  因其可以利用成熟的硅集成电路工艺, 有着诱人的应用前景, 正日益受到人们的重视. Ge 和 Si 之间晶格失配率达 4.2%, 应变使应变层的带隙大为降低<sup>[1]</sup>. 当  $x > 0.5$  时, 应变层带隙低于纯 Ge 的带隙, 这意味着  $\text{GeSi}/\text{Si}$  有可能成为用于光纤通讯的  $1.3\mu\text{m}$  和  $1.55\mu\text{m}$  红外光电探测器的理想材料. 光伏特性是表征半导体光电器件光谱响应能力的一个重要参量, 研究  $\text{GeSi}/\text{Si}$  应变层超晶格的光伏特性对实际应用是很有意义的, 我们至今尚未见到有关  $\text{GeSi}/\text{Si}$  超晶格光伏特性的研究报道. 本文采用电容耦合方法, 在等光强条件下测量了一系列不同结构的  $\text{GeSi}/\text{Si}$  应变层超晶格在  $18\sim 300\text{K}$  温度范围内的光电压谱, 并进行了初步的分析讨论.

## 1 测试装置与实验样品

我们采用电容耦合法<sup>[2,3]</sup>测量  $\text{GeSi}/\text{Si}$  应变层超晶格的光电压谱. 该方法是一种无损检测手段, 不需要制作样品的电极, 而且灵敏度很高.

将  $\text{GeSi}/\text{Si}$  样品放置在温度可以控制的 Air Products 公司的低温机的样品架上. 用溴钨灯作光源, 通过斩波器后的矩形脉冲光进入光栅单色仪, 成为具有一定频率的单色光, 再照射到样品上, 产生光电压. 为了消除光栅衍射二级光波的影响, 在单色仪的出射狭缝前安装了一个带通滤光片. 光电压经电容器高阻耦合到静电计管放大器, 经放大后再由

本文 1991 年 10 月 18 日收到, 修改稿 1992 年 1 月 26 日收到.

\* 复旦大学应用表面物理国家实验室资助课题.

EG&G 5206 锁定放大器直接读出。

本实验是在等光强条件下测量的。即要求不同波长的入射光都有相同的光子流密度。所以测量前先用 Adam Hilger 公司的真空线性温差电堆对测试系统进行等光强校对<sup>[3]</sup>，以保证照射到样品上的每一种波长的光子数相等。这样测出的光电压谱才能反映出被测样品对不同波长光的反应灵敏度。

实验样品是用分子束外延技术在 (100) 取向的 N 型 Si 衬底上生长的。先在 Si 衬底上生长一层厚度约 1000 Å 的 GeSi 合金或 Si 缓冲层，然后在缓冲层上生长 GeSi/Si 应变层超晶格，超晶格无故意掺杂。应变层的厚度小于相应的临界厚度，以保持无位错。

我们选择了 18~300K 温度范围内 18、50、100、150、200、250、300K 等 7 种温度，测量了一系列不同结构的 GeSi/Si 应变层超晶格的光电压谱。根据能带排列的情况，我们测试的样品可以分为两类。第一类样品的能带排列属于 II 型。导带势阱位于 Si 层，价带势阱位于 GeSi 合金层。如结构为  $20[\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}(100 \text{ \AA})/\text{Si}(100 \text{ \AA})]/\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}(1000 \text{ \AA})$  的样品，其编号为 A，在不同温度下的光电压谱如图 1 所示。由于缓冲层为  $\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$ ，应变发生在 Si 层，GeSi 合金层无应变。第二类样品的导带几乎没有不连续，带隙差全部落在价带上，即  $\Delta E_v \approx \Delta E_g$ 。如结构为  $20[\text{Ge}_{0.4}\text{Si}_{0.6}(75 \text{ \AA})/\text{Si}(225 \text{ \AA})]/\text{Si}(1000 \text{ \AA})$  的样品，其编号为 B，在不同温度下的光电压谱如图 2 所示。由于缓冲层为 Si，应变发生在 GeSi 合金层，Si 层无应变。

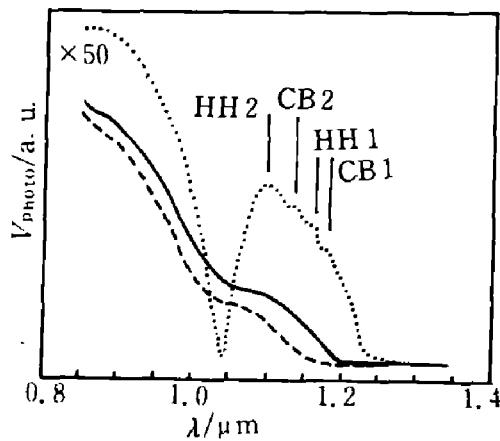


图 1 样品 A 在不同温度下的光伏谱  
(---为 18.7K, .....为 301.8K, ——为 100K)

Fig. 1 Photovoltaic spectra for sample A  
at different temperatures

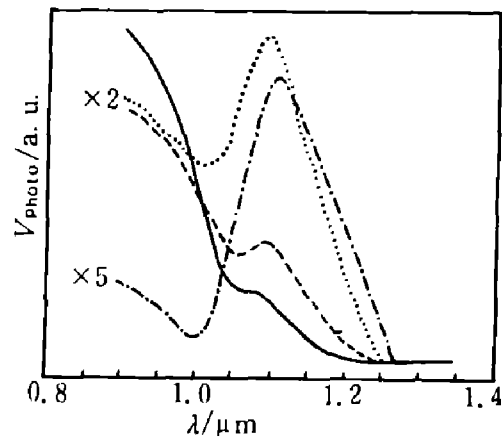


图 2 样品 B 在不同温度下的光伏谱  
(---为 20K, .....为 100K,  
---为 50K, ——为 18.4K)

Fig. 2 Photovoltaic spectra for sample B  
at different temperatures

## 2 实验结果的分析与讨论

样品 A 和 B 的能带图分别如图 3(a)、(b) 所示。为了分析实验结果，我们采用 Kronig-Penney 模型的新形式<sup>[4]</sup>计算了势阱中导带子带和价带子带的能级位置。计算中，取  $\Delta E_v = (0.74 - 0.53x_s)x$ <sup>[5]</sup>，其中  $x_s$  为缓冲层中 Ge 的组分。 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  中电子和空穴的

有效质量分别通过对 Ge 电子、Si 电子和空穴有效质量的线性内插求得. 对样品 *A* 的计算结果为: 导带势阱中共有 2 个子带 CB1 和 CB2, 分别在导带底上方 34meV 和 170meV 处; 价带势阱中也有 2 个重空穴子带 HH1 和 HH2, 分别在价带顶下方 22meV 和 131meV 处. 对样品 *B* 算得: 价带势阱中有 2 个重空穴子带 HH1 和 HH2, 分别在价带顶下方 32meV 和 207meV 处.

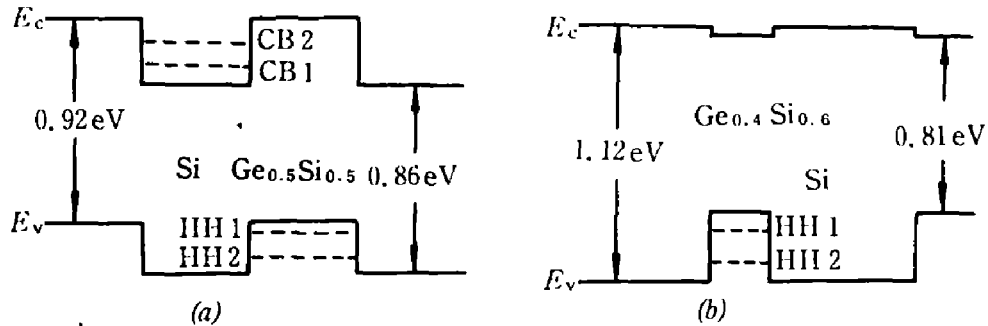


图3 样品 *A* 和 *B* 的能带图

(a)  $20[\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}(100 \text{ \AA})/\text{Si}(100 \text{ \AA})]/\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$ ; (b)  $20[\text{Ge}_{0.4}\text{Si}_{0.6}(75 \text{ \AA})/\text{Si}(225 \text{ \AA})]/\text{Si}$

Fig. 3 Energy band diagrams for samples *A* and *B*

从图 1 中可以看到, 对 310.8 K 的光伏曲线, 在长波端有 4 个峰, 随着入射光子能量的增加呈阶梯状上升, 用  $\text{CB}_n$  和  $\text{HH}_n$  表示, 分别对应于 Si 中价带到第  $n$  个导带子带和  $\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$  中第  $n$  个价带子带到导带的跃迁. 在 250 K 和 200 K 温度的光伏曲线中也可以看到这 4 个峰. 随着温度下降, 光电压增大, 但由  $\text{CB}_1$ 、 $\text{CB}_2$ 、 $\text{HH}_1$  和  $\text{HH}_2$  这 4 个峰组成的大峰相对降低, 并向短波方向移动, 而且 4 个峰也逐渐变得模糊了, 到 150 K 时 4 个峰已无法辨认. 在 100 K 以下, 大峰的形状几乎不再随温度变化. 进一步降低温度,  $\text{CB}_1$ 、 $\text{CB}_2$ 、 $\text{HH}_1$  和  $\text{HH}_2$  这 4 个峰消失. 我们认为导致这种现象可能有两个原因: 一是这 4 个峰是激子光吸收跃迁的贡献, 低温下激子比较不容易电离, 而激子只有在电离后才对光伏效应有贡献. 二是可能与激子吸收的饱和现象<sup>[6]</sup>有关, 因为对同样的人射光强度, 温度为 100 K 时, 光电压比室温下增大了约 50 倍.

与图 1 相比, 图 2 在  $1.0 \sim 1.25 \mu\text{m}$  的波长范围内也有一个大峰, 但没有观测到  $\text{HH}_n$  到导带跃迁的峰. 在  $18 \sim 300 \text{ K}$  整个温度范围内, 大峰随温度的下降而相对降低.

$\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  为晶格严重失配的应变层超晶格, 容易出现界面态, 这些界面态充当光生载流子的复合中心, 削弱了光生载流子对光伏效应的贡献, 结果在光电压谱上不出现对应光吸收的峰. 与  $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$  直接光跃迁超晶格不同的是,  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  是间接带隙超晶格, 其间接激子光跃迁较弱, 所以对界面完整性要求很高. 在样品 *B* 中没有观测到  $\text{HH}_n$  的光电压峰, 说明样品 *B* 界面不完善. 而样品 *A* 的超晶格界面较完好.

对于本文测试的样品, 光伏信号来源于 3 种光伏效应: 第一种是势阱内光吸收产生的电子和空穴, 以热激发的方式越出势阱, 在表面势垒区电场的作用下, 分别被扫向样品的前后表面, 从而产生光伏效应, 这种光生载流子通过热激发产生的光伏效应随温度降低而减弱; 第二种是光生电子和空穴在表面势垒区电场的帮助下以隧道效应的方式穿透势垒; 分别到达样品的前后表面, 产生光伏效应; 第三, 对于能带如图 3(a) 那样排列的 II 型结

构的样品, Si 层为聚集电子的势阱, GeSi 合金层为聚集空穴的势阱, 温度较低时光生载流子没有足够的能量越出势阱, 电子和空穴分别被限制在相邻的超晶格层中, 造成正负电荷在空间上的分离, 结果在超晶格中相邻的两层之间产生了光生电压, 这种由于光生载流子被限制在不同的材料层中而产生的光伏效应随温度下降有所增强.

在样品 A 中, 上述三种光伏效应同时存在. 在样品 B 中可以存在第一、二两种光伏效应, 但由于势垒较厚 (225 Å), 载流子隧穿几率很小, 所以, 实际上总光电压只取决于第一种光伏效应. 因此大峰一直随温度下降而相对降低. 第一和第二种光伏效应主要发生在表面势垒区内. 在表面势垒区外的光吸收, 由于无电场, 产生的光生载流子几乎对光伏效应没有贡献. 所以光伏信号与表面态有关, 要弄清光伏信号随温度的变化, 还须知道表面势垒与温度的关系, 这有待于进一步深入研究.

还应该说明的是, 本实验中所有样品的光伏截止波长 (光电压降为零时入射光的波长) 都比理论预期值小. 室温下, 样品 A 的理论计算截止波长为  $1.38\ \mu\text{m}$ , 而实验测量值为  $1.28\ \mu\text{m}$ ; 样品 B 的理论计算截止波长为  $1.47\ \mu\text{m}$ , 实验上只有  $1.31\ \mu\text{m}$ .

### 3 结论

通过测量  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  应变层超晶格在不同温度下的光电压谱, 我们在 II 型超晶格中观测到子带-连续带光跃迁. 在间接带隙的  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  应变层超晶格中, 只有较完好的界面才可能出现激子跃迁光伏信号峰. 在样品 A 这类 II 型超晶格中, 可能存在三种光伏效应, 而对于样品 B 这类导带几乎没有不连续的超晶格, 只可能存在两种光伏效应.

### 参 考 文 献

- 1 People R. *Phys. Rev.*, 1985, **B32**: 1405
- 2 刘士毅等. *厦门大学学报 (自然科学版)*, 1965, **12**: 51
- 3 朱文章等. *半导体学报* (待发表)
- 4 Cho H S, Prucnal P R. *Phys. Rev.*, 1987, **B36**: 3237
- 5 People R, Bean J C. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **48**: 538
- 6 Chemla D S, Miller A B. *J. Opt. Soc. Am.*, 1985, **B2**: 1155

## INVESTIGATION ON PHOTOVOLTAIC CHARACTERISTICS OF $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ STRAINED-LAYER SUPERLATTICES\*

Zhu Wenzhang, Liu Shiyi

(Physics Department, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

**Abstract:** The photovoltaic characteristics of  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  strained-layer superlattices at different temperatures have been measured by the capacitor coupling method. Four peaks corresponding to optical transitions from the valence band to electron subbands and from hole subbands to the conduction band have been observed in the samples with type-II band alignments. The cut-off wavelengths of photovoltaic measurements are shorter than those of theoretical calculations for all the samples. The variation of photovoltage with temperature has been explained preliminarily in the paper.

**Key words:** photovoltaic effect, strained-layer superlattices, interband optical transitions.

---

\* The project supported by the National Laboratory for Applied Surface Physics, Fudan University.