

文章编号: 1672-8785(2010)11-0006-05

SiGe/Si 异质结的基本特性及其探测器的应用前景

付朝雪 刘淑平

(太原科技大学应用科学学院, 山西太原 030024)

摘要: 综述了 SiGe 应变层的基本性质, 包括 SiGe 应变层的临界厚度与超晶格的稳定性、带隙和能带变化、折射率增量以及等离子色散效应。总结了材料生长中释放应力的两种形式, 包括位错和表面起伏。最后介绍了 SiGe/Si 应变量子阱光电探测器和红外焦平面阵列探测器的进展及其应用前景。

关键词: SiGe/Si ; 异质结; 超晶格; 光电探测器

中图分类号: O472 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2010.11.002

Basic Characteristics of SiGe/Si Heterojunction and Application Prospects of Photodetectors

FU Chao-xue, LIU Shu-ping

(College of Applied Science and Technology, Taiyuan Technology University, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The basic characteristics, such as critical thickness and superlattice stability, bandgap and energy band changes, increased refractive index and plasma dispersion effect, of SiGe strain layers are reviewed. Two ways to relieve stress, including dislocation and surface undulation, are summarized. Finally, the progress and application prospects of SiGe/Si strain quantum-well photodetectors and infrared focal plane array photodetectors are presented.

Key words: SiGe/Si; heterojunction; superlattice; photodetectors

1 引言

薄膜研究是近年来发展比较迅速的科学技术领域之一。人工设计的硅基材料——SiGe/Si 超晶格已使材料进入原子尺度时代, 让材料的量子尺度效应变得比其本身的化学性质更为重要^[1]。分子束外延 (MBE) 和金属有机化合物化学汽相沉积 (MOCVD) 等技术由于使 SiGe/Si 异质结和超晶格得以实现, 并能与硅基 VLSI 技术相兼容, 已引起了人们的高度重视。SiGe/Si 光电器件技术的发展, 特别是异质结双极性晶体管

(HBT) 、 SiGe/Si 光波导等性能的不断提高, 为高性能光电接收集成芯片的制作奠定了基础。SiGe/Si 光电探测器在红外探测方面的应用越来越受到重视, SiGe/Si 红外光电探测器 (特别是 1.55μm 处) 也就成了近年来的研究热点^[2]。

2 硅锗合金的基本性质

Si 和 Ge 的晶格常数分别为 0.5431nm 和 0.5658nm。它们是两种晶格失配材料, 其晶格失配率高达 4.2%, 属于大失配体系。Si_{1-x}Ge_x 合金的晶格常数会随组分 x 的变化呈线性变化。

收稿日期: 2010-07-03

基金项目: 山西省自然科学基金资助项目 (2007011047)

作者简介: 付朝雪 (1985-), 女, 河南南阳人, 硕士研究生, 研究方向为光电材料及光电器件。E-mail: fcx727@163.com

$$a_{\text{SiGe}} = a_{\text{Si}} + (a_{\text{Ge}} - a_{\text{Si}})x = a_{\text{Si}} + 0.0227x \quad (1)$$

若 x 从 0 到 1 变化, 晶格常数则相应地在 0.5431 ~ 0.5658 之间变化。只要 $x \neq 0$, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金与 Si 衬底就存在晶格失配问题, 便会产生应力。

但当 Si 衬底膜足够厚(几十纳米)且 Si 衬底上外延生长的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金外延层足够薄时, 外延层的晶格常数会受失配应力的调节, 而其晶格便会产生弹性应变, 这样就可形成无界面失配位错的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金应变层。这种不产生失配位错的应变层外延生长模式称为共度生长或赝形生长。应变层的弹性能随层厚的增加而增大:

$$E_n = 2\mu \frac{1+\nu}{1-\nu} \varepsilon^2 t \quad (2)$$

式中, μ 为切变模量, ε 为共面应变, ν 为泊松比, t 为层厚。因此, 在 Si 衬底上生长 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 应变层时存在一个临界厚度^[3,4]。

根据 Si 层应变状态的不同, 能带排列可分为 I 型(宽的 Si 带隙包含窄的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 带隙)和 II 型($\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 的导带边比 Si 的高), 其主要区别就是前者是未应变的, 而后者是应变的^[5,6]。

2.1 临界厚度与超晶格的稳定性

应变层的临界厚度是指发生应变驰豫现象时的应变层厚度, 其物理符号为 h_c 。当外延层厚度超过临界厚度时, 积聚的能量将会以失配位错的形式释放出来。

通常有两种计算临界厚度的理论模型: 力学平衡模型和能量平衡模型。在力学平衡模型中, h_c 的计算公式为

$$h_c = \frac{b}{4\pi f(1+\nu)} \left[\ln \left(\frac{h_c}{b} \right) + 1 \right] \quad (3)$$

式中, ν 是泊松比, b 是滑移距离 ($b \approx a/2$), f 是失配因子。而在能量平衡模型中, 目前由 R. People 和 J.C. Bean 推导出的计算公式为

$$h_c = \left(\frac{1.9 \times 10^{-2} \text{\AA}}{f^2} \right) \ln \left(\frac{h_c}{4 \text{\AA}} \right) \quad (4)$$

它与实验结果吻合得较好, 且 f 可表示为

$$f = \frac{a_{\text{GeSi}} - a_{\text{Si}}}{a_{\text{Si}}} x = 0.042x \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可得出 SiGe 外延层失配临界厚度与 Ge 含量的关系, 如图 1 所示。

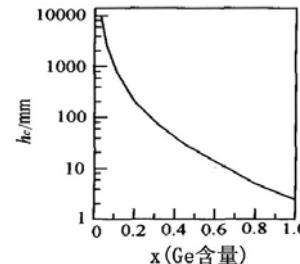


图 1 Ge 含量 x 与临界厚度 h_c 的关系图

半导体超晶格的概念是由日本科学家 Esa Ki 和华裔科学家朱肇祥首先在 1970 年共同提出的。量子阱与超晶格结构是由两种不同材料交替生长组成的超薄层一维周期结构。对于由 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 应变层和 Si 交替生长的超晶格, 假设超晶格处于孤立的自由状态下, 并设应变的两薄层的晶格常数分别为 a_{SiGe} 和 a_{Si} , 其厚度分别为 d_{SiGe} 和 d_{Si} , 当 $d_{\text{SiGe}} < h_{c\text{SiGe}}$ 且 $d_{\text{Si}} < h_{c\text{Si}}$ 时, 生长的超晶格不会有任何失配位错。如果两层的弹性系数相同, 并且厚衬底不受薄外延层的影响, 由能量平衡原则可知, 超晶格层中能量最小的条件为 $d_{\text{Si}}\varepsilon_{\text{Si}} = d_{\text{SiGe}}\varepsilon_{\text{SiGe}}$ 。实际上, 超晶格的生长必须靠衬底支撑, 这样超晶格的薄层才能受到力的作用, 从而使平行于界面的晶格常数与衬底的晶格常数 a_{Si} 相等。在此条件下, 超晶格的临界厚度仍可用 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 的应变层的临界厚度公式表示, 但必须用平均失配因子 f_{av} 替代失配因子 f :

$$f_{av} = \frac{a_{av} - a_{\text{Si}}}{a_{\text{Si}}} = 0.042x_{av} \quad (6)$$

式中, a_{av} 为两个超晶格层面内的晶格的常数, x_{av} 为超晶格的平均组分。式(6)表示周期性连贯的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 超晶格, 它可以被当作组分等于平均值的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 单层来计算^[3,7]。

2.2 带隙和能带变化

应变半导体超晶格的能带和体材料的能带不同, 它首先表现为应变层的带隙变化。Ge、Si 和 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 均为间接带隙半导体材料。在室温下, Ge 的带隙为 0.67eV, Si 的为 1.17eV, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的带隙介于 0.67eV 和 1.17eV 之间。

当 $x > 0.5$ 时, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的带隙低于纯锗, 这就说明 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 有可能成为 $1.3\mu\text{m} \sim 1.5\mu\text{m}$ 红外光电探测器的理想材料^[8]。

在 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 应变层异质结构中, 应变的存在会使能带结构发生变化。这不但会使应变层的带隙比相同合金组分的体材料的小, 而且还会使简并的导带底和价带顶的能量发生分裂。在 $\text{Si}(100)$ 衬底上生长的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的六度简并的导带底会分裂成沿生长方向的二度简并态和平行于界面方向的四度简并态; 价带则会分裂成重空穴带和轻空穴带^[7,10]。 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金在室温下的禁带宽度与锗含量 x 之间的关系可简单地描述为 $E_g(x) = 1.12 - 0.74x(\text{eV})$ ^[11]。

2.3 折射率增量

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的折射率一般比 Si 的折射率有所增加:

$$\Delta n = \Delta n_c + \Delta n_s \quad (7)$$

式中, Δn_c 和 Δn_s 分别是由 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金中的组分引起的折射率增量和由应变引起的折射率增量。当 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 外延层的厚度小于临界厚度时, Δn_s 值很小, 可以忽略不计。 Δn_c 是一个与 Ge 含量 x 有关的量, 常采用 R.Asoref 等人的红移理论模型来描述, 其吸收光谱除了向长波段方向平移外, 与硅的吸收光谱非常相似。因此, 假定 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的折射率曲线可由纯硅的折射率曲线平移得出^[3,7,10]。根据该模型, 当 $x < 0.2$ 时, Δn_c 满足以下关系:

$$\Delta n_c = \begin{cases} 0.09x & (\text{非应变}) \\ 0.18x & (\text{应变}) \end{cases} \quad (8)$$

另外, 当锗含量 $x > 0.2$ 时, 可用线性差值法计算 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的折射率^[3], 即

$$n_{\text{GeSi}} = n_{\text{Si}} + (n_{\text{Ge}} - n_{\text{Si}})x = n_{\text{Si}} + 0.8x \quad (9)$$

2.4 等离子色散效应

掺杂或注入都可使半导体中的自由载流子浓度发生改变, 而任何自由载流子都会对材料的光学参数产生影响, 这种效应称为等离子色散效

应。研究发现, 当锗含量 $x < 0.85$ 时, 硅锗合金的导带结构仍类似于硅。从光吸收机理来看, 完全可以认为 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的能带结构与 Si 的类同, 只是随着锗组分的掺入, 其禁带宽度变窄, 使光吸收谱向长波方向移动, 且在红外波段的透明性较好。根据 Drude 模型, 可将由 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 中的自由载流子引起的等离子色散效应类似地写为

$$\Delta n = -\frac{q^2\lambda^2}{8\pi^2c^2\varepsilon_0n_{\text{SiGe}}} \left(\frac{\Delta N_e}{m_{ce\text{SiGe}}^*} + \frac{\Delta N_h}{m_{ch\text{SiGe}}^*} \right) \quad (10)$$

式中, q 为电子的电荷, ε_0 为真空介电常数, n 为纯硅的折射率, $m_{ce\text{SiGe}}^*$ 为电子电导有效质量, $m_{ch\text{SiGe}}^*$ 为空穴电导有效质量, n_{SiGe} 为硅锗合金的折射率, ΔN_e 和 ΔN_h 分别为相对于本征浓度 N_i 的电子和空穴浓度的变化量^[3,10,12]。

3 材料

生长出高质量的材料是制备高性能器件的关键。通过加入锗组分生长 SiGe/Si 多层量子阱, 人们已经成功制备出对 $1.3\mu\text{m}$ 波长敏感的探测器。但由于受临界厚度和量子限制效应的限制, 响应波长在 $1.5\mu\text{m}$ 的 SiGe/Si 探测器的制作存在一定的难度, 人们为此一直在进行研究, 以期得到解决。

尽可能减小量子限制能是实现 $1.5\mu\text{m}$ 光电探测器的关键, 因此必须提高硅锗合金中的锗组分并增加硅锗层的厚度。而硅锗合金的失配应力必定会通过某种形式释放。当锗组分 $x < 0.2$ 时, 它会通过产生位错来释放失配引起的应力; 当 $0.2 < x < 0.6$ 时, 它会通过生成均匀的 3-D 岛来释放应力; 而当 $x > 0.6$ 时, 它会通过遵循典型的 SK 模式进行三维生长, 并会以锗纳米岛结构形式释放应变能。由此可见, 硅锗合金失配应力的释放主要有两种形式: 产生位错和形成表面起伏^[10,8]。

4 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 光电探测器的进展

4.1 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 应变量子阱 (QW) 光电探测器

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 应变量子阱材料研究具有重大意义。在 SOI 上外延生长的 SiGe 合金具有较窄

的能隙, 可实现对 $1.3\mu\text{m}$ 波长光的响应。但它是间接带隙材料, 其光吸收系数 α 较小, 限制了外量子效应的提高。为了提高探测外量子效应, 人们采用了用波导结构将光波限制在 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 多量子阱波导层内传输的办法。

加拿大 Dan-xia Xu 等人^[14]采用超高真空化学汽相沉积法 (UHVCVD) 在硅衬底上生长出了 MSM 结构的 SiGe 波导型光电探测器。该光电探测器在 $1.3\mu\text{m}$ 处的光响应度为 1A/W , 在 $1.55\mu\text{m}$ 处的光响应度为 0.1A/W 。图 2 为该探测器的结构图。

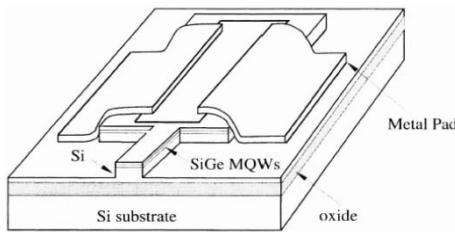


图 2 SiGe/Si 表面起伏多量子阱波导型探测器的结构图

其波长及响应度如图 3 所示。

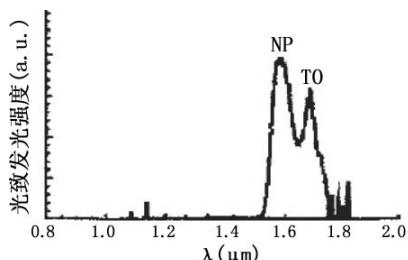


图 3 SiGe/Si 表面起伏多量子阱波导型探测器的 PL 谱

复旦大学表面物理实验室^[15]成功研制出了 $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ 应变多量子阱波导型光电探测器。在 -5V 偏压下, 该光电探测器在 $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ 处的响应为 0.07A/W , 暗电流为 64nA , 外量子效应达到了 18.2% 。

采用波导结构可以弥补 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 多量子阱材料对光的弱吸收, 以此结构制作出的器件可以在一定程度上获得较好的响应度和外量子效应。但由于这种器件的面积较大及波导层的厚度较薄, 其速度和效率的提高仍受到限制, 因此这样并不能从根本上解决问题。

Lin 等人^[16]报道了一种 δ 摻杂 $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ 量子阱探测器, 其探测波长在 $3\mu\text{m} \sim 7\mu\text{m}$ 。当 $V_G = 1\text{V}$ 时, 它在 15K 下的峰值响应为 1.3mA/W 。

Lee 等人^[17]利用快速热化学汽相沉积法 (RTCVD) 在 P 型 Si(100) 衬底上以 SK 生长模式淀积自组装 Ge 量子点, 然后生长 200nm 厚的 Si 缓冲层, 并在缓冲层上生长 10 个周期的厚 20nm 的 $\text{Si}_{0.8}\text{Ge}_{0.2}$ 量子阱薄层。其中, 每个薄层都被在 $T_g = 700^\circ\text{C}$ 下生长的 30nm 厚的 Si 隔离层所隔离。在 $T=10\text{K}$ 时, 其在峰值响应波长 $\lambda = 5.2\mu\text{m}$ 处的响应度为 0.134A/W 。

当量子阱与超晶格结构满足一定条件时, 它的电子-光子转换效率会远远超过体单晶^[1], 因此对 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 应变量子阱的研究具有特殊意义。

4.2 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 红外焦平面阵列 (IRFPA)

美国 Shepherd 等人^[18]首先提出将异质结内光电发射 (HIP) 应用于异质结红外探测器 (IRD) 的概念, 随后又提出了硅化物肖特基势垒探测器 (SBD) 焦平面阵列 (FPA) 的概念^[19]。从此之后, 在大规模、高集成电路工艺中, 短波红外 ($1\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$) 和中波红外 ($3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$) 硅基 FPA 的制备技术日益成熟, 这主要是因为红外成像系统可完全利用成熟的硅超大规模集成电路 (VLSI) 工艺技术。

硅基红外焦平面阵列是一种单片集成成像器件, 具有较好的红外响应均匀性、高可靠性和高分辨率, 并且与 VLSI 工艺技术相兼容, 因此其容易实现。而硅化物探测器的研制又是实现该器件的关键, 因此, 国外自上世纪 80 年代以来掀起了 PtSi 红外焦平面阵列的研制狂潮。许多著名的研发小组在这场竞争中都取得了突破性的成就^[20]。

Xiao 等人^[21]于 1993 年首次报道了 $\text{Pd}_2\text{Si}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 和 $\text{PtSi}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 肖特基势垒长波红外探测器。在 $600^\circ\text{C} \sim 700^\circ\text{C}$ 温度范围内, 他们利用快速热化学汽相沉积法 (RTCVD) 在轻掺杂 P 型 Si(100) 衬底上依次生长出了组分渐变的 $\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y$ ($y: 0 \sim x$) 层、 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金层和 Si

盖帽薄层。通过改变锗组分，其截止波长超过了 $8\mu\text{m}$ ，并有望达到 $10\mu\text{m}$ 。它在 $\lambda = 2.5\mu\text{m}$ 处的响应度为 0.1A/W (是 PtSi/Si 的 2.5 倍)，其技术与 PtSi/Si 焦平面阵列技术相兼容。后来他们还报道了势垒高度可调的 PtSi/SiGe/Si 肖特基二极管长波红外探测器^[22]。

1991 年，美国麻省理工学院林肯实验室^[23]演示了一种采用响应波长超过 $10.5\mu\text{m}$ 的 320×244 元 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结红外探测器的成像器。同年，他们还报道了响应波长为 $9.3\mu\text{m}$ 的 400×400 元 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结红外探测器阵列。另外，Wada 等人^[24]于 1999 年研制出了 512×512 元的 SiGe/Si 异质结红外焦平面阵列。

1993 年，复旦大学成功研制出了截止波长达 $9\mu\text{m}$ 的 $\text{P}^+ \text{-} \text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x / \text{P}^- \text{Si}$ 异质结内光电发射红外探测器^[1]，在 52K 下，该探测器的 D_{500K}^* 为 $2.0 \times 10^8 \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。国内在焦平面探测器方面的研究进展相对国外比较缓慢，尤其是在 2000 年至 2005 年期间几乎处于空白阶段。虽然近几年在规模和性能方面得到了快速发展，但是红外焦平面探测器的发展空间仍然很大。

5 结束语

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结光电探测器比传统的光电探测器更易于单片集成，其成品率高、光吸收均匀性好，并且与 Si 技术相兼容，因此备受人们青睐。在我国，中科院等研究单位开展的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结光电器件研究在某些方面已经达到国际先进水平。随着军事及遥感遥测技术的发展，红外焦平面阵列的需求日益增加， $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 探测器件也有望在不久之后进入工业界，形成高科技产业。虽然 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 异质结焦平面阵列探测器的性能优于传统探测器，但是由于须生长较厚的缓冲层，其很难实现高度集成。因此，目前的关键问题是提高 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 材料的性能，并试制出适应高速发展和扩大需求的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 器件。 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 光电探测器将会成为整个红外探测器件中的重要支柱。

参考文献

- [1] 李美成, 赵连城. 硅基异质结光电探测器用材料的应用研究进展 [J]. 半导体杂志, 1999, 24(4): 23–29.

- [2] 时文华, 王启明. 硅基近红外探测器研究进展 [J]. 半导体光电, 2005, 26(6): 471–475.
- [3] 刘淑平. 光电材料及光波导探测器的设计与研制 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2003.
- [4] 刘国军, 叶志镇, 吴贵斌, 等. SiGe/Si 异质结光电器件 [J]. 材料导报, 2006, 20(1): 116–119.
- [5] Maitia C K, Samantaa S K, Chatterjee S, et al. Determination of band offsets in strained Si heterolayers [J]. Thin Solid Films, 2004, 462–463: 80.
- [6] People R, Bean J C. Band alignments of coherently strained $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ heterostructures on (001) $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ substrates [J]. Appl. Phys. Lett., 1986, 48(8): 538–540.
- [7] 盛篪, 蒋最敏, 陆昉, 等. 硅锗超晶格及低维量子结构 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2004.
- [8] 杨红卫, 吴实. 硅基红外探测器的研究进展 [J]. 物理与工程, 2002, 12(3): 39–41.
- [9] 陈荔群, 周志文, 李成, 等. Si 基 Ge 波导光电探测器的制备和特性研究 [J]. 光电子·激光, 2009, 20(8): 1012–1014.
- [10] 李欢, 牛萍娟, 李俊一, 等. 近红外锗硅光电探测器的研究进展 [J]. 光电技术应用, 2006, 21(4): 18–21.
- [11] Roosevelt P. Physics and application of $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ strained-layer heterostructures [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1986, 22(9): 1696–1710.
- [12] 张海鹏, 章红芳, 吕幼华. $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{SOI}$ 材料的基本性质与应用前景 [J]. 半导体技术, 2004, 29(3): 35–40.
- [13] 李传波, 黄昌俊, 成步文, 等. $1.55\mu\text{m}$ Si 基光电探测器的研究进展 [J]. 半导体光电, 2003, 24(2): 79–83.
- [14] Xu D X, Janz S, Lafontaine H, et al. Photodetectors for $1.3\mu\text{m}$ and $1.55\mu\text{m}$ wavelengths using SiGe undulating MQW's on SOI substrates [J]. SPIE, 1999, 3630: 50–57.
- [15] Li B J, Jiang Z M, Pei C W, et al. Integration of wavelength signal divider and infrared photodetectors based on the plasma dispersion effect in SiGe/Si [J]. Appl. Phys. Lett., 1999, 74(12): 1163–1165.
- [16] Lin C H, Liu C W. MOS Si/Ge photodetectors [J]. SPIE, 2006, 6368: 636806.1–636806.12.
- [17] Lee S W, Kim T G, Hirakawa K, et al. Lateral photoconductivity and bound states of self-assembled Ge/Si quantumdots [J]. Nanotechnology, 2007, 18(10): 5403.
- [18] Shepherd F D. Schottky barrier photodiode with degenerate semiconductor active region: US, 3603847 [P]. 1969-06-11.
- [19] Shepherd F D, Yang A C. Silicon Schottky retinas for infrared imaging [J]. IEDM Tech, 1973: 310–313.

(下转第 19 页)