

# 1.55 $\mu\text{m}$ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 光波导与 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 多量子阱探测器集成的优化设计\*

李宝军 李国正 刘恩科

(西安交通大学微电子工程系, 西安 710049)

**摘 要** 对 1.55  $\mu\text{m}$  波长的  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  光波导和  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  多量子阱(MQW)红外探测器的集成器件结构进行了系统的分析和优化设计。优化结果为: 1) 对  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  光波导, Ge 含量  $x = 0.05$ , 脊宽、高和腐蚀深度分别为 8、3 和 2.6  $\mu\text{m}$ ; 2) 对  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  多量子阱红外探测器, Ge 含量  $x = 0.5$ , 探测器由厚度为 550 nm、23 个周期的 6 nm  $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ + 17 nm Si 组成, 长度约 2 mm。结果表明, 这种结构器件的内量子效率可达 88%。

**关键词**  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , 光波导, 量子阱, 探测器。

## 1 引 言

Si 因成本低和工艺相当成熟而成为微电子器件和光电子器件集成的最佳首选材料。以 Si 为主体的  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  合金除具有等离子体色散效应的特点外, 还因其晶格常数、禁带宽度、折射率等随 Ge 组份  $x$  变化而成为当今国际上最为活跃的课题之一。 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  合金已广泛用于异质结双极型晶体管(HBT)和光电子集成器件(OEIC's)。用  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  合金制作的光波导具有很低的损耗( $< 0.5 \text{ dB/cm}$ )。用  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  合金制作的红外探测器可克服 Ge 探测器漏电大和噪声高、GaAsIn 等化合物探测器高成本以及与 Si 微电子技术不相容的缺点, 同时还可弥补 Si 探测器长波限为 1.1  $\mu\text{m}$ 、响应峰值在 0.8  $\mu\text{m}$  处的不足, 使其响应波长与光通信窗口(1.3~ 1.6  $\mu\text{m}$ )匹配。用  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  合金作为光的吸收层, 可通过调节 Ge 含量  $x$  来研制不同波段的光探测器。但由于  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  合金与单晶 Si 的晶格常数不同, 在 Si 上共度生长的  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  层不能太厚。为了增加用作光吸收的  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  层厚度, 就必须采用  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  多量子阱结构, 使器件的设计与制作由原来的“杂质工程”变成“能带工程”。量子阱超晶格红外探测器具有响应快、量子效率高、波长可变、带宽可变的特点。它可在室温工作并能实现大面积集成和制作大面积面阵<sup>[1]</sup>, 将成为新一代的红外探测器。国内外虽然相继出现了一些研究报道<sup>[2~6]</sup>, 但这些报道都只是针对光纤通信的两个重要窗口(1.3  $\mu\text{m}$  和 1.55  $\mu\text{m}$ )之一的 1.3  $\mu\text{m}$  波长而言的, 且都只是分离结构的器件。Schmidtchen 等人(1992)也只是在 Si 基上研制了 1.3  $\mu\text{m}$  和 1.55  $\mu\text{m}$  的 SiGe 光波导<sup>[7]</sup>。Splett 等人<sup>[8]</sup> 虽在 1994 年首次报道了其研制的  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  波导与

\* 国家自然科学基金资助的重点项目。

收稿日期: 1996 年 12 月 4 日; 收到修改稿日期: 1997 年 2 月 24 日

Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>/Si 探测器的集成器件,但也只是适用于 1.3 μm 的波长。由于 1.3 μm 和 1.55 μm 是光纤通信的两个重要窗口,因而,在光电子集成器件的研究中,将波长拓宽到 1.55 μm 至关重要。为此,本文对 1.55 μm 波长的 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 光波导和 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>/Si 多量子阱探测器及其集成进行了分析和优化设计,为下一步的实验工作奠定了基础。

## 2 器件结构

图 1 是 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 脊形光波导和 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>/Si 多量子阱探测器集成的基本结构。多量子阱探测器的顶部由约 100 nm 厚的 Si 缓冲层和约 50 nm 厚的 n<sup>+</sup>-Si 接触层组成。1.55 μm 的光沿波导的横断面直接耦合进入 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 光波导后,在波导中向前传播的同时,一部分向上耦合进入多量子阱探测器被吸收,从而产生电子-空穴对。在外加反向偏压下,这些电子-空穴对的漂移形成光电流。

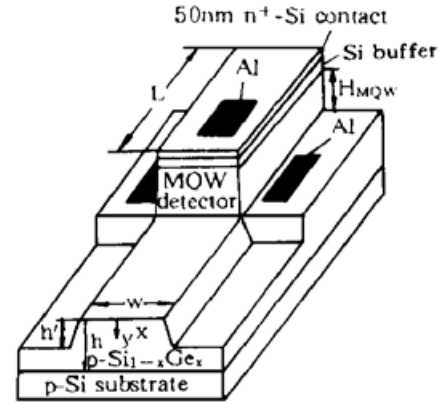


Fig. 1 Perspective view of a waveguide and photodetector combination in silicon

## 3 理论分析

### 3.1 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 应变层的临界厚度

Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 合金的晶格常数与 Ge 含量  $x$  有关,其测量结果已有很多报道,根据最新研究结果,其晶格常数为<sup>[9]</sup>

$$a(x) = a_{Si} + 0.214x + 0.0105x^2 \quad (1)$$

应变 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 合金是生长在面密度为  $6.8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  的 Si (100) 面上的,其禁带宽度<sup>[10]</sup>

$$E_g^{\text{strained}} \cong 1.0905 - 0.962x + 0.4306x^2 - 0.1672x^3, \quad (\text{eV}) \quad (2)$$

由此可知, Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>/Si 是一种典型的晶格失配异质结构体系,晶格失配率  $f_m(x) = 0.042x$ 。为了减少 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>/Si 界面间的失配位错,就得控制合金层的厚度,使之小于产生失配的最大临界厚度  $h_c$ 。虽然有关文献中给出了不同的理论模型和相差比较大的实验测量值,但由于  $h_c$  的精确程度影响到对光的限制和低光纤耦合损耗,因而,  $h_c$  的精确程度在计算探测器的效率中是一个非常重要的量。根据最详细的研究结果,计算应变 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 层临界厚度的关系式为<sup>[11]</sup>

$$h_c = \left[ \frac{1-\nu}{1+\nu} \right] \left[ \frac{1}{20\pi \sqrt{2}} \right] \left[ \frac{b^2}{a(x)} \right] \left[ \left[ \frac{1}{f_m^2(x)} \right] \ln \left[ \frac{h_c}{b} \right] \right] \quad (3)$$

其中,  $b$  为 Burger 矢量模数,  $\nu$  为泊松比 ( $\approx 0.3$ ),  $f_m(x)$  为衬底-合金的失配率, (3) 式简化为

$$x^2 h_c = 13.3 \ln (h_c/4) \quad (4)$$

### 3.2 光波导的单模截止特性

要在脊形 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 波导中只传播 1.55 μm 的单模光,要求波导在  $x$  和  $y$  方向上同时满足单模的承载条件。根据有效折射率法,脊形波导在  $y$  方向上的模截止特性可用下面类似于三层平板波导的截止方程来确定

$$(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} k_0 h = \nu \pi + \text{tg}^{-1} \sqrt{S} \quad (5)$$

$$S = (n_2^2 - n_0^2)/(n_1^2 - n_2^2) \quad (6)$$

式中,  $h$  为脊形波导的内脊高,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  为真空中波数,  $\nu$  为导模阶数(对于单模光波导,  $0 \leq$

$v < 1$ ),  $n_1$  为  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  的折射率,  $n_2$  为衬底 Si 的折射率,  $n_0 = 1$ 。

脊形波导在  $x$  方向上的单模截止条件是

$$\frac{4k_0}{T} \left[ \left( \frac{WT}{2} + 1 \right) (n_1^2 - R^2 - N_{nm}^2)^{1/2} - R \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{n_1^2 - R^2 - N_{nm}^2}{R} \right)^{1/2} \right] = (2m + 1)\pi \quad (7)$$

$$R = \frac{(n + 1)\pi}{S + k_0h} \quad (8)$$

$$T = \frac{k_0 \operatorname{tg} \alpha}{S + k_0h} \quad (9)$$

$$S = (n_1^2 - n_2^2)^{-1/2} + (n_1^2 - n_0^2)^{-1/2} \quad (10)$$

其中,  $\alpha = 54.7^\circ$ ,  $m$ 、 $n$  分别是  $x$  和  $y$  方向上的模数,  $N_{nm}$  为  $nm$  阶导模的有效折射率。

### 3.3 多量子阱探测器的吸收系数和有效吸收系数

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  是间接带隙半导体。在本征吸收过程中, 电子不仅吸收光子, 同时还和晶格交换一定的振动能量, 即放出或吸收一个声子。因而,  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  间接带隙半导体的跃迁过程是电子、光子和声子三者同时参与的过程, 在理论上是一种二级过程。理论分析可得<sup>[12]</sup>, 当  $h\nu$  (光子能量)  $> E_g$  (禁带宽度) +  $E_p$  (声子能量) 时, 吸收声子和发射声子的跃迁均可发生, 吸收系数为

$$\alpha(h\nu) = A_a \frac{(h\nu - E_g + E_p)^2}{\exp(E_p/kT) - 1} + A_e \frac{(h\nu - E_g - E_p)^2}{1 - \exp(-E_p/kT)} \quad (11)$$

当  $E_g - E_p < h\nu \leq E_g + E_p$  时, 只能发生吸收声子的跃迁, 吸收系数为

$$\alpha(h\nu) = A_a \frac{(h\nu - E_g + E_p)^2}{\exp(E_p/kT) - 1} \quad (12)$$

当  $h\nu \leq E_g - E_p$  时, 跃迁不能发生,  $\alpha = 0$ 。(11) 式、(12) 式中  $A_a$ 、 $A_e$  基本为一常数。

对  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  交替组成的量子阱超晶格结构, 其组份  $x$  可用一等效组份  $x_{av}$  表示,

$$x_{av} = [t_{\text{GeSi}}/(t_{\text{GeSi}} + t_{\text{Si}})]x = rx \quad (13)$$

其中,  $t_{\text{GeSi}}$  和  $t_{\text{Si}}$  分别是多量子阱中  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  和 Si 层的总厚度。则  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  多量子阱的总厚度  $H_Q$  满足

$$(rx)^2 H_Q = 13.3 \ln(H_Q/4) \quad (14)$$

其吸收系数可用一有效吸收系数代替<sup>[13]</sup>

$$\alpha_{\text{eff}} = r\Gamma\alpha \quad (15)$$

式中  $\Gamma$  是有源的多量子阱对光的限制因子。 $\Gamma$  可通过计算矩形波导中的横向电场分布  $E(x, y)$  得到, 用进入  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  多量子阱有源区的光功率与总的光功率比值表示为

$$\begin{aligned} \Gamma &= \frac{\iint_{ar} |E(x, y)|^2 dx dy}{\iint_{\infty} |E(x, y)|^2 dx dy} \\ &= \frac{\int_{-\infty}^{x-ar} |E_x(x)|^2 dx \int_{-\infty}^{y-ar} |E_y(y)|^2 dy}{\int_{-\infty}^{\infty} |E_x(x)|^2 dx \int_{-\infty}^{\infty} |E_y(y)|^2 dy} \\ &= \Gamma_x \Gamma_y \end{aligned} \quad (16)$$

## 4 优化设计

### 4.1 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 波导的优化设计

用 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 合金材料制作光波导器件时, 由于 Ge 的组份很小 ( $x \leq 10\%$ ), 因而, Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 仍以 Si 为主体, 其等离子体色散效应与 Si 的类似, 可表示为

$$\Delta n = - \frac{q^2 \lambda^2}{8\pi^2 c^2 \epsilon_0 n} \left( \frac{\Delta N_e}{m_{ce}^*} + \frac{\Delta N_h}{m_{ch}^*} \right) \quad (17)$$

其中,  $n = n_{Si} + 0.18x$ ,  $q$  为电子电荷,  $c$  为光速,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $\lambda$  为波长,  $\Delta N_e$  和  $\Delta N_h$  分别为 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 中电子和空穴的浓度变化。 $m_{ce}^*$  和  $m_{ch}^*$  分别是 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 中电子和空穴的电导有效质量, 满足

$$m_{ce}^* = (0.26 - 0.14x) m_0 \quad (18)$$

$$m_{ch}^* = (0.39 - 0.29x) m_0 \quad (19)$$

其中  $m_0$  是电子的质量。

对  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  的波长, 当  $\Delta N_e (= \Delta N_h) = 10^{19} \text{cm}^{-3}$  时, 可计算出由等离子体色散效应引起的折射率变化为  $2.0 \times 10^{-2}$  量级时的  $x = 0.03 \sim 0.06$ 。由图 2 得到对应于  $x = 0.04, 0.05, 0.06$  时 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 层的临界厚度分别为  $6.5, 4, 2.6 \mu\text{m}$ 。考虑到工艺等实际因素, 选取  $x = 0.05$ 。为了获得  $x = 0.05$  时光波导的内脊高  $h$  ( $\leq 4 \mu\text{m}$ )、脊宽  $w$  和腐蚀深度  $h'$  的数据, 由(5) ~ (10) 式并结合  $n_1 = n_2 + 0.18x$  得到图 3 所示的传播单模时内脊高  $h$  的范围随 Ge 含量  $x$  的变化关系。从而得到  $x = 0.05$  时,  $h = 1.54 \sim 4.64 \mu\text{m}$ 。由于内脊高  $h$  的值不能超过临界厚度, 为此, 选取  $h$  为  $3 \mu\text{m}$  和  $4 \mu\text{m}$ 。再由脊宽  $w$  与腐蚀深度  $h'$  的变化关系(图 4) 确定出传播  $1.55 \mu\text{m}$  波长的光时, Si<sub>0.95</sub>Ge<sub>0.05</sub> 脊形波导宽度  $w = 8 \mu\text{m}$ , 对应的腐蚀深度  $h' = 2.6 \mu\text{m}$ 。

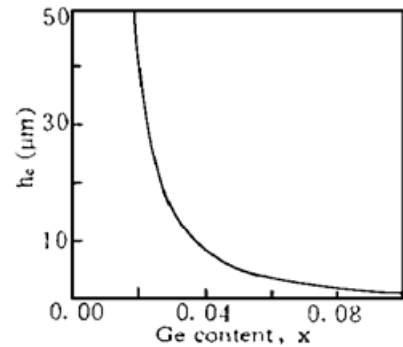


Fig. 2 Critical thickness versus Ge content  $x$  for Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> waveguide

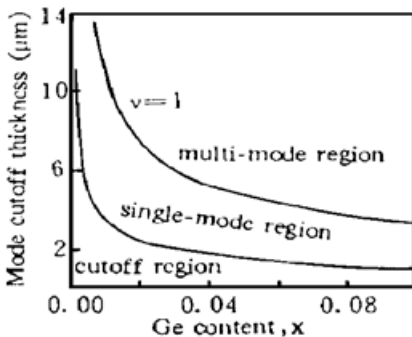


Fig. 3 Mode cutoff thickness versus Ge content  $x$  of Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>

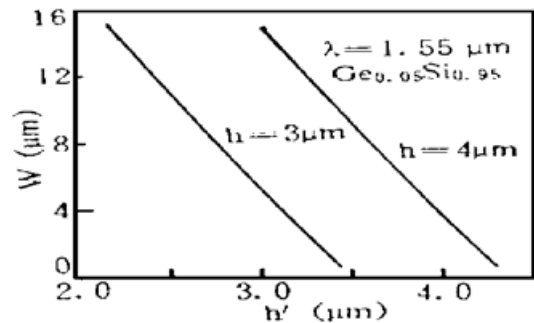


Fig. 4 Rib width versus etched depth for Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> waveguide

### 4.2 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>/Si 多量子阱探测器的优化设计

对 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>/Si 多量子阱探测器, Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 是吸收层, 其本征吸收长波限  $\lambda = 1.24/E_g$  ( $\mu\text{m}$ ), 将(2)式代入后得到对应于  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  的最小 Ge 含量  $x_{\min} = 0.31$ 。为了能对光进行有效地吸收, 取  $x = 0.5$ 。对  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  的波长, 光子能量  $h\nu = 0.8 \text{eV}$ , Si<sub>0.5</sub>Ge<sub>0.5</sub> 的禁带宽

度  $E_g = 0.69625$  eV, 声子的能量  $E_p$  通常小于百分之几。因而,  $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$  的吸收系数满足 (11) 式, 图 5 是吸收系数随波长的变化关系。

为了确定多量子阱探测器的总厚度, 得到其有效吸收系数与探测器厚度  $H_Q$  的关系(图 6)。由图 6 知, 若  $H_Q$  较小, 虽然  $\alpha_{\text{eff}}$  较大, 但探测器会很长; 若  $H_Q$  选取的较大, 可使探测器长度变短, 易于实现高度集成, 但会降低  $\alpha_{\text{eff}}$ 。为此选取  $\alpha_{\text{eff}} = 10 \sim 11 \text{ cm}^{-1}$ ,  $H_Q$  约 550 nm。再由 (14) 式得  $r = 0.2643$ 。由 (4) 式知,  $x = 0.5$  时  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  单层的临界厚度  $h_c = 21$  nm, 现取  $t_{\text{SiGe}} = 6$  nm, 则由  $r = t_{\text{SiGe}} / (t_{\text{Si}} + t_{\text{SiGe}})$  可得  $t_{\text{Si}} = 17$  nm。从而确定出多量子阱的周期数 ( $< H_Q / (t_{\text{Si}} + t_{\text{SiGe}}) = 23.9$ ) 为 23。

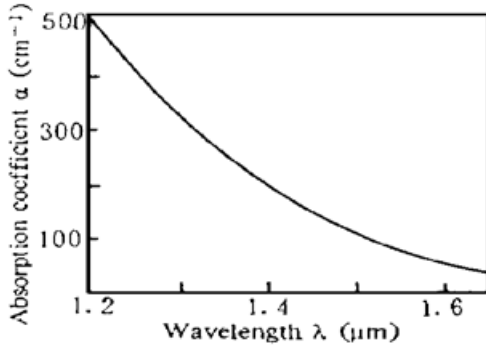


Fig. 5 Absorption coefficient versus wavelength

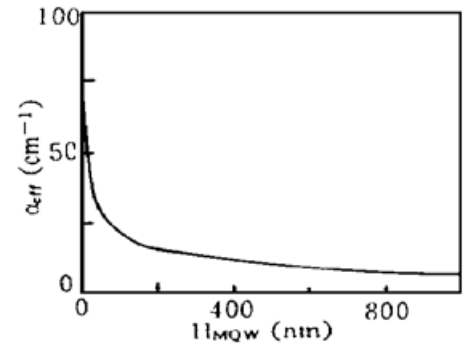


Fig. 6 Effective absorption coefficient versus total thickness of  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  MQW detector

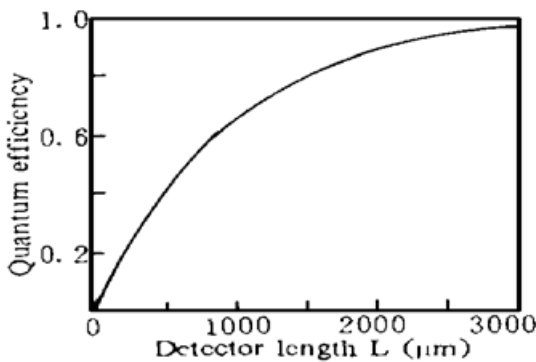


Fig. 7 Quantum efficiency versus detector length

对图 1 所示的波导和探测器集成的器件,  $1.55 \mu\text{m}$  的光是在波导中边传播边耦合进入探测器而被探测的, 其量子效率为

$$\eta = 1 - \exp(-\alpha L) \quad (20)$$

式中  $L$  是探测器的长度。图 7 是  $H_Q = 550$  nm 时量子效率随探测器长度的变化关系。从图 7 可看出, 在探测器厚度一定的情况下, 探测器越长, 量子效率越高。但考虑到探测器太长时导致大的器件面积而限制其响应速度, 并使暗电流增大, 噪声因子也变大。因而, 探测器长度取 2 mm 为宜, 其内量子效率为 88%。

**结束语** 本文针对光纤通信的重要波长  $1.55 \mu\text{m}$ , 对以  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  合金材料为主的光电子集成器件进行了系统的分析和优化设计。优化的器件具有高达 88% 的内量子效率。所得结构参数令人满意, 在工艺上是完全可以实现的。从而使弱信号能被探测, 使  $1.55 \mu\text{m}$  波长光的观察成为可能。

### 参 考 文 献

- [1] D. S. Shen, J. P. Conde, V. Chu *et al.*, Amorphous silicon-germanium thin-film photodetector array. *IEEE Electron Device Lett.*, 1992, **13**(1) : 5~ 7
- [2] B. Jalali, A. F. J. Levi, F. Ross *et al.*, SiGe waveguide photodetectors grown by rapid thermal chemical vapor deposition. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(3) : 269~ 271

- [3] X. Xiao, J. C. Sturm, S. R. Parihara *et al.*, Silicide/strained  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  schottky-barrier infrared detectors. *IEEE Electron Device Lett.*, 1993, **14**(4) : 199~ 201
- [4] T. L. Lin, J. S. Park, S. D. Gunapala *et al.*, Photoresponse model for  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  heterojunction internal photoemission infrared detector. *IEEE Electron Device Lett.*, 1994, **15**(3) : 103~ 105
- [5] R. T. Carline, D. J. Robbins, M. B. Stanaway *et al.*, Long-wavelength SiGe/Si resonant cavity infrared detector using a bonded silicon-on-oxide reflector. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(4) : 544~ 546
- [6] 李国正, 张浩,  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  应变超晶格雪崩光电探测器的分析与优化设计. 光学学报, 1996, **16**(6) : 839~ 843
- [7] J. Schmidtchen, B. Schuppert, A. Splett *et al.*, Germanium-diffused waveguides in silicon for  $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$  and  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  with losses below 0.5 dB/cm. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(8) : 875~ 877
- [8] A. Splett, T. Zinke, K. Petermann *et al.*, Integration of waveguides and photodetectors in SiGe for 1.3  $\mu\text{m}$  operation. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(1) : 59~ 61
- [9] G. Theodorou, P. C. Kelires, C. Tserbak, Structural, electronic, and optical properties of strained  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  alloys. *Phys. Rev. (B)*, 1994, **50**(24) : 18355~ 18359
- [10] R. People, S. A. Jackson, Structurally induced states from strain and confinement in semiconductors and semimetals, New York, Academic, 1990 : 119~ 174
- [11] R. People, Physics and applications of  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  strained-layer heterostructures. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1986, **QE-22**(9) : 1696~ 1710
- [12] R. Braunstein, A. R. Moore, F. Herman, Intrinsic optical absorption in germanium-silicon alloys. *Phys. Rev.*, 1958, **109**(3) : 695~ 710
- [13] S. Luryi, T. P. Pearsall, H. Temkin *et al.*, Waveguide infrared photodetectors on a silicon chip. *IEEE Electron Device Lett.*, 1986, **7**(2) : 104~ 107

## Optimizing Design of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ Waveguide and $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ MQW Photodetector for 1.55 $\mu\text{m}$ Operation

Li Baojun    Li Guozheng    Liu Enke

(Microelectronic Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

(Received 4 December 1996; revised 24 February 1997)

**Abstract** A systematic analysis and optimizing design have been conducted for the integration of  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  optical waveguide and  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  multiple quantum wells (MQW) infrared detector at  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  operation. The optimizing design results are: (1) For  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  optical waveguide, Ge content  $x = 0.05$ . Rib width, height and etched depth of the waveguide are 8, 3 and 2.6  $\mu\text{m}$ , respectively; (2) For  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$  MQW infrared detector, Ge content  $x = 0.5$ . Total thickness of the detector is 550 nm, which consists of 23 periods 6 nm  $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$  + 17 nm Si. The length of the detector is about 2 mm. The results show that the internal quantum efficiency of such structure devices can be as higher as 88%.

**Key words**  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ , optical waveguide, MQW, detector.