

1.55 μm $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 光开关与光探测器集成的分析及设计*

李宝军 李国正 刘恩科

(西安交通大学微电子工程系 西安 710049)

提要 对 1.55 μm 波长的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 光波导开关和 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 红外探测器的集成结构进行了系统的理论分析和优化设计。设计结果为:(1) 对 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 光开关, Ge 含量 $x = 0.05$, 波导的内脊高、脊宽和腐蚀深度分别为 3, 8.5 和 2.6 μm , 分支角为 5~6°。要实现 1.55 μm 波长光的开关作用, $p-n^+$ 结上所需加的正向偏压值应为 0.97 V;(2) 对 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 探测器, Ge 含量 $x = 0.5$, 探测器由 23 个周期的 6 nm $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ 和 17 nm Si 交替组成厚度为 550 nm, 长度约为 1.5~2 mm 的超晶格, 内量子效率达 80% 以上。

关键词 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, 光开关, 探测器

1 引言

光开关在光计算、复用通信、光交换、超大容量高速光信息处理等高新技术领域中被认为是最关键的控光器件。人们已经研制出全 $\text{Si}^{[1]}$ 和 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}^{[2,3]}$ 光波导开关, 利用 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 合金的等离子体色散效应研制成 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 无间距定向耦合光开关^[4]。并且研制出 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 红外探测器^[5-8]。但目前所报道的这些光开关和红外探测器都只是针对 1.3 μm 波长的分离结构。J. Schmidtchen 等^[9]也只是在 Si 基上研制了 1.3 μm 和 1.55 μm 的 SiGe 光波导。A. Splett 等^[10]虽在 1994 年首次报道了其研制的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 波导与 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 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, 在光电子及其集成器件的研究中, 将波长拓宽到 1.55 μm 至关重要。为此, 本文对 1.55 μm 波长的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 光开关与 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 红外探测器及其集成进行了分析和设计, 为下一步的实验工作奠定了基础。

2 器件结构

图 1(a) 和(b) 分别是 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 全内反射光开关的顶视和截面示意图。它由 X 形交叉脊形光波导构成, 图中 R 是反射区(即折射率变化区)。当光开关处于开态时, 没有载流子注入, 反射区 R 的折射率 n_R 与光波导的折射率 n 相等, 从 1 端入射的光束将透过反射区 R 传输到 4 端。当

* 国家自然科学基金(69636040)重点资助项目。

反射区的 pn^+ 结上加有正向偏压 V 时, 将有载流子注入到波导中, 使其载流子浓度发生改变, 从而引起材料的折射率变化。由于材料中自由载流子浓度增大时其折射率将减小, 使反射区 R 的折射率 $n_R < n$, 从而自 1 端入射的光束将经反射区表面全反射到 3 端, 实现光开关的关态。

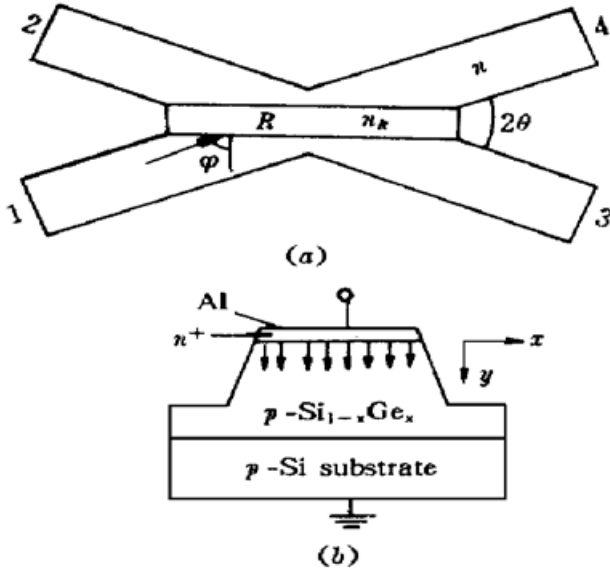


图 1 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 全内反射交叉脊形光开关
(a) 顶视图; (b) 截面图

Fig. 1 Intersection rib optical switch of $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ based on total internal reflection
(a) top view; (b) cross section view

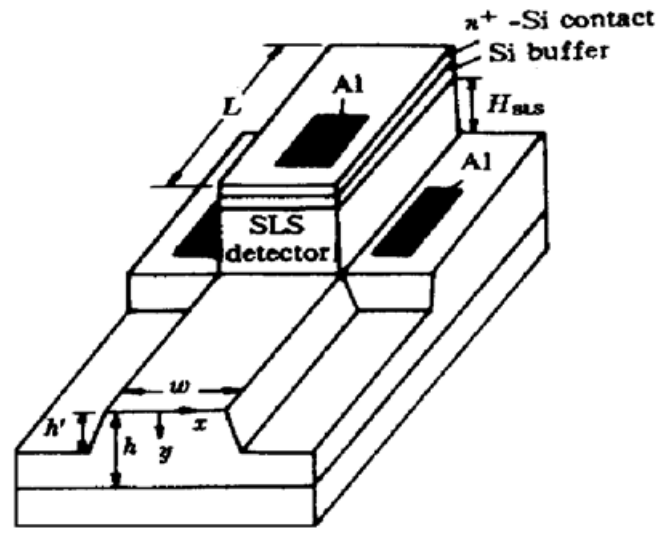


图 2 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 光开关与超晶格探测器的集成
Fig. 2 Integration of an optical switch and a superlattices detector in $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$

图 2 是在 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 光开关输出端的分支上集成有 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 探测器的基本结构。探测器是由 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 和 Si 交替组成厚度为 H_{SLS} , 长度为 L 的超晶格, 其顶部由约 100 nm 厚的 Si 缓冲层和约 50 nm 厚的 n^+ - Si 接触层组成。1.55 μm 的光在波导中向前传播的同时, 一部分向上耦合进入探测器被吸收, 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, 从而被探测。

3 理论分析

3.1 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的载流子注入及其等离子体色散效应

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 全内反射交叉脊形光开关是在 p - $\text{Si}(100)$ 衬底上外延生长 p 型 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 波导形成的, 如图 1(b) 所示。电子在扩散区内的浓度分布为^[11]

$$\Delta N_p(y) = \Delta N_p(0)(1 - y/h) \quad (1)$$

式中 $\Delta N_p(0)$ 是 $y = 0$ 处注入的电子浓度。由于 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金材料中 Ge 的组份很小 ($x \leq 10\%$), 因而, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金仍以 Si 为主体, 其等离子体色散效应为

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

其中 $n = 3.47 + 0.18x$ 为 1.55 μm 处 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金的折射率, q 为电子电荷, c 为光速, ϵ_0 为真空介电常数, λ 为波长, ΔN_e 和 ΔN_h 分别为 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金中电子和空穴的浓度变化。 m_{ce}^* 和 m_{ch}^* 分别为 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金中电子和空穴的电导有效质量, 由下式确定

$$m_{ce}^* = m_{ce(\text{Si})}^*(1 - x) + m_{ce(\text{Ge})}^*x \quad (3)$$

$$m_{ch}^* = m_{ch(Si)}^* (1 - x) + m_{ch(Ge)}^* x \quad (4)$$

由此可见,当波导中自由载流子浓度增大时,引起反射区的折射率 n_R 变小。由 Snell 定律知,若 $1.55 \mu\text{m}$ 光的入射角大于其临界角,则可发生全反射。

3.2 Si_{1-x}Ge_x 应变层的临界厚度和光波导的单模截止特性

Si_{1-x}Ge_x 合金的晶格常数和禁带宽度都与 Ge 含量 x 有关,因而 Si_{1-x}Ge_x/Si 是一种典型的晶格失配异质结构体系。Si_{1-x}Ge_x 合金的禁带宽度为^[12]

$$E_g^{\text{strained}} \cong 1.0905 - 0.962x + 0.4306x^2 - 0.1672x^3 (\text{eV}) \quad (5)$$

为了减少 Si_{1-x}Ge_x/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 。根据最详细的研究结果,计算应变 Si_{1-x}Ge_x 层临界厚度的关系式为^[13]

$$x^2 h_c = 13.3 \ln(h_c/4) \quad (6)$$

要在脊形 Si_{1-x}Ge_x 波导中传播 $1.55 \mu\text{m}$ 的单模光,光波导除满足临界厚度(6)式外,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

$$(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} k_0 h = \nu \pi + \text{tg}^{-1} \sqrt{S} \quad (7)$$

$$S = (n_2^2 - n_0^2)/(n_1^2 - n_2^2) \quad (8)$$

式中 h 为脊形波导的内脊高, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空中波数, ν 为导模阶数(对于单模光波导, $0 \leq \nu < 1$), n_1 为 Si_{1-x}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为

$$\frac{4k_0}{T} \left[\left[\frac{WT}{2} + 1 \right] (n_1^2 - R^2 - N_{nm}^2)^{1/2} - R \text{tg}^{-1} \left(\frac{(n_1^2 - R^2 - N_{nm}^2)^{1/2}}{R} \right) \right] = (2m + 1) \pi \quad (9)$$

$$R = \frac{(n + 1) \pi}{S + k_0 h} \quad (10)$$

$$T = \frac{k_0 \text{tg} \alpha}{S + k_0 h} \quad (11)$$

$$S = (n_1^2 - n_2^2)^{-1/2} + (n_1^2 - n_0^2)^{-1/2} \quad (12)$$

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

3.3 光开关的分支角和分支特性

当 Si_{1-x}Ge_x 光开关处于关态时,以入射角 φ 入射的光束在反射区 R 表面被反射,根据全反射条件, φ 必须满足

$$\varphi \geq \varphi_c = \sin^{-1}(n_R/n) \quad (13)$$

式中 φ_c 为光束在反射区表面发生全反射时的临界角。由于 $\theta + \varphi = \pi/2$, 可得 $\theta \leq \pi/2 - \varphi_c$, 则脊形交叉光开关的最大半交叉临界角 θ_c 为

$$\theta_c = \pi/2 - \varphi_c = \pi/2 - \sin^{-1}(n_R/n) \quad (14)$$

当有载流子注入时引起反射区的折射率减小 Δn , 所以(14)式可写为

$$\theta_c = \pi/2 - \sin^{-1}(1 - \Delta n/n) \quad (15)$$

由于 Si_{1-x}Ge_x/Si 光波导的分支区长度远大于 $1.55 \mu\text{m}$, 因此可将反射区视为无限长。在发生全反射时,只考虑光波与导波模式的耦合。通过解 Maxwell 方程,并利用 Fresnel 公式,可得 $1.55 \mu\text{m}$ 光的透射率 P 和反射率 R 分别为^[13]

$$P = \frac{2\sin\theta}{\sin\theta + \sqrt{(1 + \Delta n/n)^2 - \cos^2\theta}} \quad (16)$$

$$R = \frac{\sin\theta - \sqrt{(1 + \Delta n/n)^2 - \cos^2\theta}}{\sin\theta + \sqrt{(1 + \Delta n/n)^2 - \cos^2\theta}} \quad (17)$$

$$\text{传输端消光比} \quad E = 10\log P \quad (18)$$

$$\text{通道串音} \quad C = 10\log(P/R) \quad (19)$$

$$\text{反射损耗} \quad L = 10\log(1/R) \quad (20)$$

3.4 探测器的有效吸收系数和量子效率

$\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 是间接带隙半导体, 其本征吸收过程中的跃迁是电子、光子和声子三者同时参与的过程。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^[14]

$$\alpha(h\nu) = A_a \frac{(h\nu - E_g + E_p)^2}{\exp(E_p/kT) - 1} + A_e \frac{(h\nu - E_g - E_p)^2}{1 - \exp(-E_p/kT)} \quad (21)$$

式中 A_a, A_e 基本为一常数。

探测器的吸收层是由 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 和 Si 交替组成的超晶格结构, 其组份 x 可用一等效组份 x_{av} 表示

$$x_{av} = [t_{\text{GeSi}}/(t_{\text{GeSi}} + t_{\text{Si}})]x = rx \quad (22)$$

其中, t_{GeSi} 和 t_{Si} 分别为 SLS 中 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 和 Si 层的总厚度。则 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ SLS 的总厚度 H_{SLS} 满足

$$(rx)^2 H_{\text{SLS}} = 13.3 \ln(H_{\text{SLS}}/4) \quad (23)$$

其吸收系数可用一有效吸收系数代替^[15]

$$\alpha_{\text{eff}} = r\Gamma\alpha \quad (24)$$

式中 Γ 为有源的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 超晶格对光的限制因子, 可通过计算矩形波导中的横向电场分布 $E(x, y)$ 得到, 用进入有源区的光功率与总光功率的比值表示为

$$\Gamma = \frac{\iint_{\text{active-region}} |E(x, y)|^2 dx dy}{\iint_{\infty} |E(x, y)|^2 dx dy} \quad (25)$$

对图 2 所示的光开关和探测器集成的器件, 1.55 μm 的光是在波导中边传播边耦合进入探测器而被探测的, 内量子效率为

$$\eta = 1 - \exp(-\alpha L) \quad (26)$$

式中 L 为探测器的长度。

4 设计和结果

4.1 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 波导的设计

要实现对 1.55 μm 光的开关作用, 由等离子体色散效应引起的折射率变化应为 2.0×10^{-2} 量级, 注入载流子浓度引起 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 合金中电子和空穴浓度的变化应为 $\Delta N_e (= \Delta N_h) > 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 假定 $\Delta N_e = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 则由(2) ~ (4) 式得到由等离子体色散效应引起折射率变化为 2.0×10^{-2} 量级时的 $x = 0.03 \sim 0.06$ 。再由(6) 式得到对应于 $x = 0.04, 0.05$ 时 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$

层的临界厚度分别为 $6.5, 4 \mu\text{m}$, 考虑到工艺等实际因素, 选 $x = 0.05$ 。解方程(1) 可得到 pn^+ 结上所需加的正向偏压 $V = 0.97 \text{ V}$ 。

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(7) ~ (12) 式得到图 3 所示传播单模时内脊高 h 随 Ge 含量 x 的变化范围, 从而确定出 $x = 0.05$ 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 $h = 3 \mu\text{m}$ 。再由脊宽 w 与腐蚀深度 h' 的变化关系图 4 确定出传播 $1.55 \mu\text{m}$ 光时, $\text{Si}_{0.95}\text{Ge}_{0.05}$ 脊形波导宽度 $w = 8.5 \mu\text{m}$, 对应的腐蚀深度 $h' = 2.6 \mu\text{m}$ 。

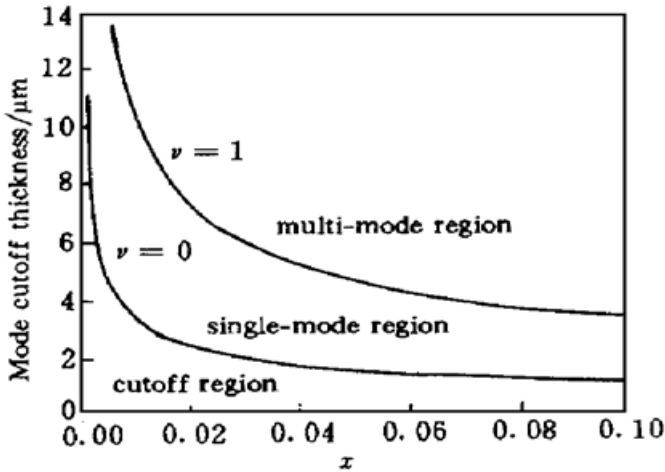


图 3 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 光波导的模截止厚度与 Ge 含量 x 的关系

Fig. 3 Mode cutoff thickness versus Ge content x for $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$

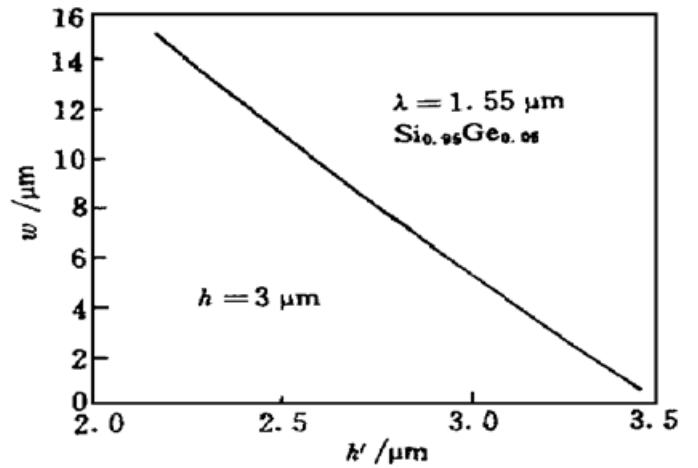


图 4 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 光波导的脊宽 w 与腐蚀深度 h' 的关系

Fig. 4 Rib width w versus etched depth h' for a $\text{Si}_{0.95}\text{Ge}_{0.05}$ waveguide

4.2 光开关分支角的设计

为了设计出光开关的分支角, 由(2) ~ (4) 式得到 $x = 0.05$ 时 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 折射率的变化 Δn 为

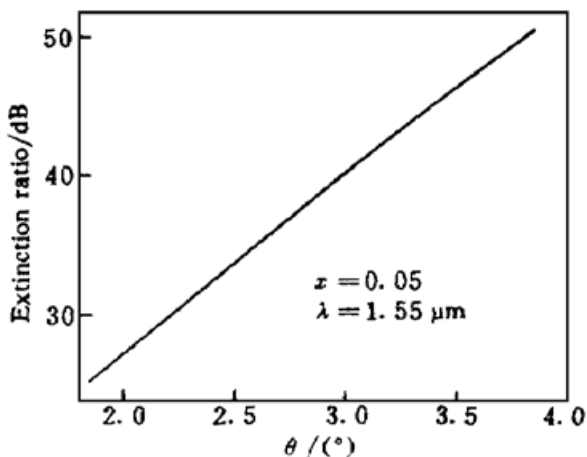


图 5 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 光开关传输端消光比与 θ 的关系

Fig. 5 Extinction ratio versus branch angle θ for a $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ optical switch

0.0205 , 再由(15) 式得 $\theta_c = 6.2^\circ$ 。图 5~ 7 分别是由(16) ~ (20) 式得到的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 光开关传输端消光比、通道串音和反射损耗与 θ 的关系。由此可看出, 随着 θ 的增大, 消光比增大, 串音会降低, 但波导的损耗增大; 若 θ 较小, 虽然可减小波导的损耗, 但串音又会增大, 消光比会降低。另外, 为了实用化, 波导的串音和损耗应分别小于 -20 dB 和 1 dB/cm , 消光比应大于 30 dB 。因而, 对 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 光波导开关, 综合考虑以上各因素后, 选取 $5 \sim 6^\circ$ 的分支角为宜。

4.3 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ SLS 探测器的设计

对 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ SLS 探测器, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 是吸收层, 其本征吸收长波限 $\lambda = 1.24/E_g (\mu\text{m})$, 将(5) 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的吸收, 取 $x = 0.5$ 。由于 λ

$= 1.55 \mu\text{m}$ 时, 光子能量 $h\nu = 0.8 \text{ eV}$, $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ 的禁带宽度 $E_g = 0.69625 \text{ eV}$, 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(21) 式, 由此得到 $\alpha = 80 \text{ cm}^{-1}$ 。

为了确定 SLS 探测器的总厚度, 由图 8 所示的 SLS 探测器有效吸收系数与其厚度 H_{SLS} 的关系可知, 若 H_{SLS} 较小, 虽然 α_{eff} 较大, 但为了达到对 1.55 μm 光的有效吸收, 探测器会很长; 若 H_{SLS} 较大, 可使探测器长度变短, 易于实现高度集成, 但会降低 α_{eff} 。因而选取 $\alpha_{\text{eff}} = 10 \sim 11 \text{ cm}^{-1}$, H_{SLS} 约为 550 nm, 再由(23) 式得 $r = 0.2643$ 。另外, 由(6) 式得到 $x = 0.5$ 时 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 单层的临界厚度 $h_c = 21 \text{ nm}$, 现取 $t_{\text{SiGe}} = 6 \text{ nm}$, 则由 $r = t_{\text{SiGe}} / (t_{\text{Si}} + t_{\text{SiGe}})$ 可得 $t_{\text{Si}} = 17 \text{ nm}$ 。从而确定出 SLS 的周期数($< H_{\text{SLS}} / (t_{\text{Si}} + t_{\text{SiGe}}) = 23.9$) 为 23。

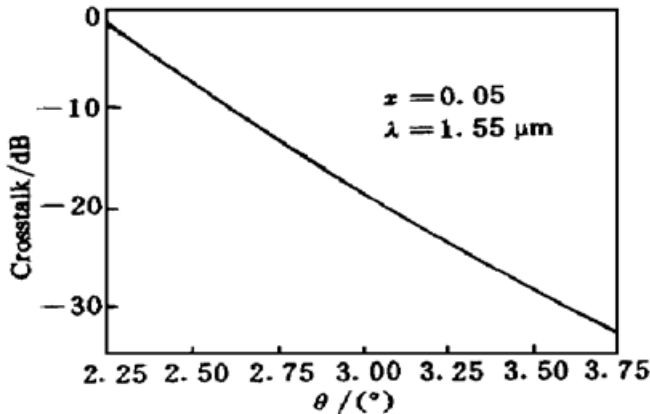


图 6 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 光开关串音与 θ 的关系

Fig. 6 Crosstalk versus branch angle θ for a $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ optical switch

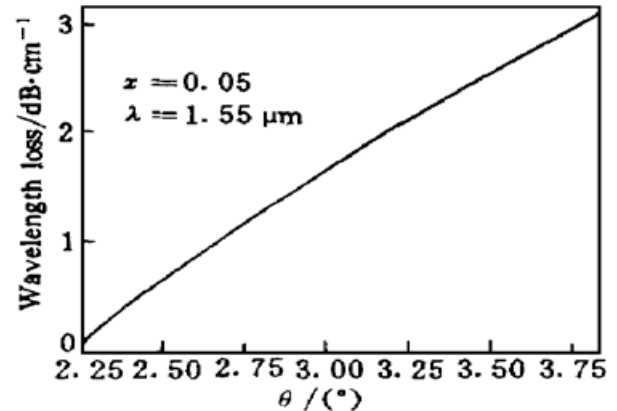


图 7 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 光开关波导损耗与 θ 的关系

Fig. 7 Waveguide loss versus branch angle θ for a $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ optical switch

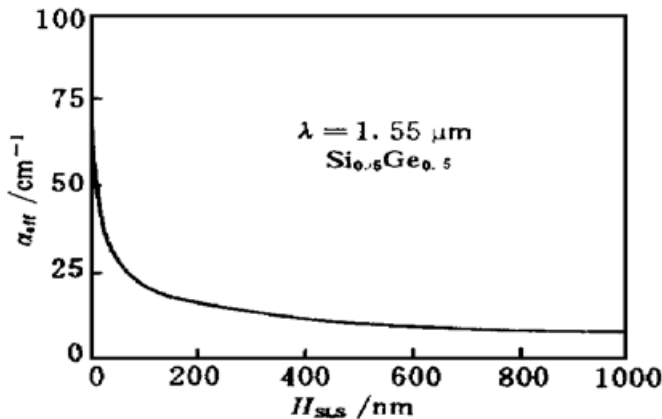


图 8 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ SLS 探测器有效吸收系数与其厚度 H_{SLS} 的关系

Fig. 8 Effective absorption coefficient versus total thickness of a $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ SLS detector

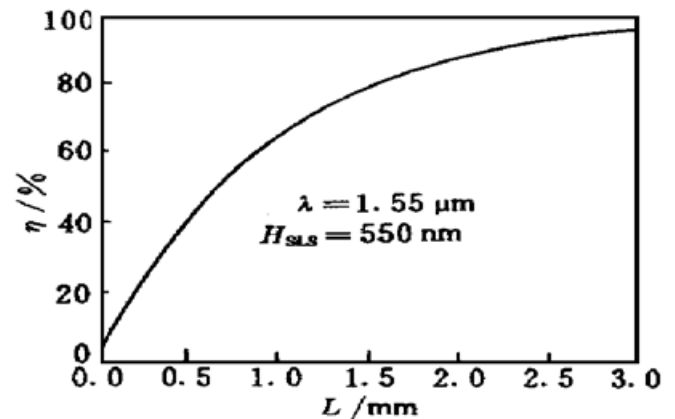


图 9 $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}/\text{Si}$ SLS 探测器的量子效率随探测器长度的变化关系

Fig. 9 Quantum efficiency versus detector length for a $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}/\text{Si}$ SLS detector

图 9 是 $H_{\text{SLS}} = 550 \text{ nm}$ 时量子效率随探测器长度的变化关系。从图 9 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 1.5~ 2 mm 为宜, 且其内量子效率可高达 80% 以上。

参 考 文 献

- 1 Y. L. Liu, E. K. Liu, G. Z. Li *et al.*. Novel silicon waveguide switch based on total internal reflection. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(16) : 2079~ 2080
- 2 U. Fischer, B. Schüppert, K. Petermann. Integrated optical switches in silicon based on SiGe-waveguides. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(7) : 785~ 787

- 3 U. Fischer, B. Schüppert, K. Petermann. Optical waveguide switches in silicon based on Ge-indiffused waveguides. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(8) : 978~ 980
- 4 Y. Gao, G. Z. Li, X. D. Liu *et al.*. SiGe/Si bifurcation optical active switch based on plasma dispersion effect. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(20) : 1740~ 1741
- 5 B. Jalali, A. F. J. Levi, F. Ross *et al.*. SiGe waveguide photodetectors grown by rapid thermal chemical vapour deposition. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(3) : 269~ 271
- 6 X. Xiao, J. C. Sturm, S. R. Parihar *et al.*. Silicide/strained Si_{1-x}Ge_x schottky-barrier infrared detectors. *IEEE Electron Device Lett.*, 1993, **14**(4) : 199~ 201
- 7 T. L. Lin, J. S. Park, S. D. Gunapala *et al.*. Photoresponse model for Si_{1-x}Ge_x/Si heterojunction internal photoemission infrared detector. *IEEE Electron Device Lett.*, 1994, **15**(3) : 103~ 105
- 8 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
- 9 J. Schmidtchen, B. Schüppert, 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
- 10 A. Splett, T. Zinke, K. Petermann *et al.*. Integration of waveguides and photodetectors in SiGe for 1.3 μm operation. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(1) : 59~ 61
- 11 Li Baojun, Li Guozheng, Liu Enke. Y-branch wavelength signal divider on Si_{1-x}Ge_x/Si. *J. Infrared Millim. Waves* (红外与毫米波学报), 1997, **16**(4) : 251~ 255 (in Chinese)
- 12 R. People, S. A. Jackson. Structurally induced states from strain and confinement in semiconductors and semimetals. New York : Academic, 1990, 119~ 174
- 13 Li Baojun, Liu Enke. Intersectional rib optical waveguide switch with bow-tie electrode on carriers injection total internal reflection. *Chinese J. Semiconductors*(半导体学报), 1997, **18**(4) : 281~ 285(in Chinese)
- 14 Li Baojun, Li Guozheng, Liu Enke. Optimizing design of Si_{1-x}Ge_x waveguide and Si_{1-x}Ge_x/Si MQW photodetector for 1.55 μm operation. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(12) : 1718~ 1723 (in Chinese)
- 15 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

Analysis and Design of Optical Switch and Superlattices Photodetector Combination in Si_{1-x}Ge_x/Si for 1.55 μm Operation

Li Baojun Li Guozheng Liu Enke

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

Abstract A systematic analysis and optimum design have been reported for the integration of the Si_{1-x}Ge_x optical switch and the Si_{1-x}Ge_x/Si infrared detector at $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$. The optimizing design results are: (1) For the Si_{1-x}Ge_x optical switch, Ge content $x = 0.05$. Waveguide height, width and etched depth are 3, 8.5 and 2.6 μm , respectively, branch angles are 5~ 6°, and the bias voltage of pn^+ junction is 0.97 V. (2) For the Si_{1-x}Ge_x/Si infrared detector, Ge content $x = 0.5$. Total thickness of the detector is 550 nm, which consists of 23 periods alternate 6 nm Si_{0.5}Ge_{0.5}+ 17 nm Si. The length of the detector is about 1.5~ 2 mm. The results show that the internal quantum efficiency of the detector of this structure can be as high as 80%.

Key words Si_{1-x}Ge_x, optical switch, detector