

# 多模干涉导波 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 波分复用器\*

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** 利用多模干涉自成像原理分析设计了具有较小循环周期比的  $1.3\mu\text{m}$  与  $1.55\mu\text{m}$  波长的  $\text{Si}_{0.96}\text{Ge}_{0.04}/\text{Si}$  波分复用器。通过模的传播分析法对其传输特性进行分析发现,在  $8\mu\text{m}$  的耦合区宽度和  $1150\mu\text{m}$  的最佳耦合长度,这种器件对  $1.3\mu\text{m}$  和  $1.55\mu\text{m}$  波长光的对比度均在  $40\text{dB}$  以上,且插入损耗小于  $4.0 \times 10^{-3}\text{dB}$ 。

EEACC: 6150C, 5230, 1320

## 1 引言

波分复用器(Wavelength Division Multiplexing-WDM)是光通信系统中的重要器件,它能增大单模光纤通信系统的信息容量。虽然已研制出了包括定向耦合器<sup>[1]</sup>、不对称 Y 分支器<sup>[2]</sup>、不对称 Mach-Zehnder 干涉仪<sup>[3]</sup>等在内的具有波分复用功能的器件,但这些 WDM 的运作波长不完全在光纤通信的主要波段( $1.3\mu\text{m}$  和  $1.55\mu\text{m}$ )。因而,人们又研制<sup>[4-6]</sup>和设计<sup>[7,8]</sup>出了  $1.3\mu\text{m}$  和  $1.55\mu\text{m}$  波长的 WDM。可惜的是所研制的器件<sup>[4-6]</sup>难以与 Si 微电子器件很好地进行单片集成。近年来,随着多模干涉在集成光学中的迅速应用<sup>[9-11]</sup>,人们已研制出了多模干涉(Multi-Mode Interference-MM I)WDM<sup>[12-14]</sup>。尽管这些 MM I WDM 的适用波长和所用的材料各不相同,但 MM I WDM 一个诱人的优点就是低的损耗、小的尺寸和大的制作容限。这给研制易于单片集成的低损耗 WDM 指明了方向。另外,在 Si 基 SiGe 光波导<sup>[15,16]</sup>和 SiGe/Si 无间距定向耦合器<sup>[17,18]</sup>方面的研制成功,使得用 MM I 自成像原理设计和研制既能满足  $1.3\mu\text{m}$  和  $1.55\mu\text{m}$  光通信波长,又能利用成熟的 Si 工艺实现大规模单片集成的 Si 基 MM I WDM 成为可能。为此,本文率先用 MM I 原理分析和设计了  $1.3\mu\text{m}$  和  $1.55\mu\text{m}$  波长的 Si 基 SiGe WDM,为下一步的实验工作奠定了基础。

## 2 WDM 的基本结构

图 1(a)是  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  脊形波导 WDM 的结构示意图,它是在 Si(100)衬底上生长  $\text{Si}_{1-x}$

\* 国家自然科学基金(69636040)重点资助项目

李宝军 男,1964 年出生,博士生,讲师,目前从事 Si 基光电子器件及其集成技术的研究

李国正 男,1939 年出生,副教授,主要从事微电子技术和 Si 基光电子器件及其集成技术的研究

刘恩科 男,1930 年出生,教授,博导,主要从事微电子技术和 Si 基光电子器件及集成光学和技术的研究

1997-04-05 收到,1997-09-06 定稿

Ge<sub>x</sub> 层形成的 图中  $w (= 2a\lambda)$  是脊宽,  $h (= 2b\lambda)$  是内脊高,  $h' (= 2b(1-r)\lambda)$  是腐蚀深度  $a$  和  $b$  分别是脊宽和脊高因子,  $r$  是腐蚀深度因子,  $\lambda$  是自由空间的光波长 图 1(b) 是其顶视图,  $W_M$  和  $L_M$  分别是MM I区的宽度和耦合长度 当  $1.3\mu\text{m}$  和  $1.55\mu\text{m}$  波长的光由WDM 的一端耦合入基模后, 该基模传输到MM I区时, 因波导宽度突然增大, 其场宽也必然增大 由于增大了的场宽与基模之间不满足连续性条件, 必然同时伴随着另外模式—多模的激发 这样, 这些模在MM I区发生干涉 由于各种模的传播常数不同, 因而存在着相位差 如果MM I区的长度  $L_M$  满足一定条件, 则可将  $1.3\mu\text{m}$  和  $1.55\mu\text{m}$  波长光干涉所成的象通过输出端的两单模波导分离并输出

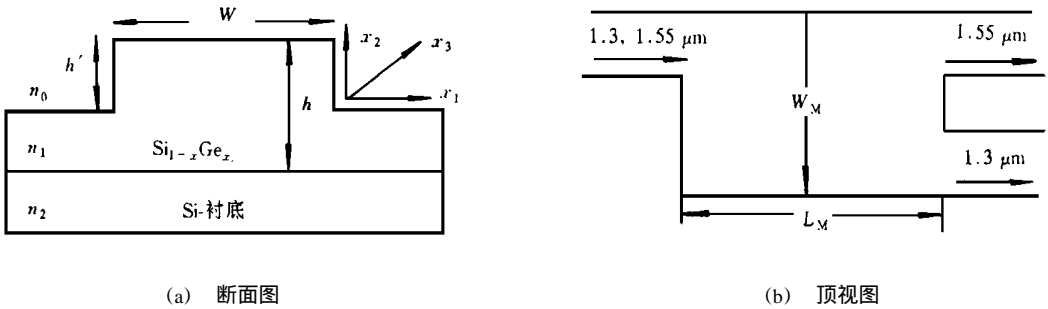


图 1 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 脊形波导 WDM 的结构示意图

### 3 理论

#### 3.1 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 脊形波导

WDM 的输入和输出端是由单模波导构成的, 中间部分为多模干涉区 为了使WDM 的输入端和两输出分支端只传输单模光, 其横向和纵向结构尺寸必须满足单模条件 根据文献 [19], 当脊高  $h > 4\lambda$  时, 单模脊形光波导的脊宽与内脊高之比应满足:

$$\frac{a}{b} = \left( \frac{q + 4\pi b}{4\pi b} \right) \times \frac{1 + 0.3 \sqrt{\left( \frac{Q + 4\pi b}{q + 4\pi r b} \right)^2 - 1}}{\sqrt{\left( \frac{q + 4\pi b}{q + 4\pi r b} \right)^2 - 1}} \quad (1)$$

$$q = \frac{\gamma_0}{\sqrt{n_1^2 - n_0^2}} + \frac{\gamma_2}{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} \quad (2)$$

对 HE 模,  $\gamma_{0,2} = 1$ ; 对 EH 模,  $\gamma_{0,2} = (n_{0,2}/n_1)^2$ .

#### 3.2 MM I区的场分布

在MM I区, 光场分布  $\Psi(x_1, x_2, x_3)$  可写为二维标量 Helmholtz 波动方程

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x_2^2} + \left( \frac{2\pi n(x_1, x_2)}{\lambda} \right)^2 \Psi = \beta^2 \Psi \quad (3)$$

$$\Psi(x_1, x_2, x_3) = \sum_{\nu=0}^{m-1} C_\nu \Psi_\nu(x_1, x_2) \exp[i(\omega t - \beta x_3)] \quad (4)$$

其中  $x_1$  表示横向;  $x_2$  表示纵向;  $x_3$  是传播方向;  $C_\nu$  是场的激发系数;  $\Psi_\nu(x_1, x_2)$  是模场;  $n(x_1, x_2)$  是折射率;  $\beta_\nu$  是模的传播常数;  $\nu = 0, 1, 2, \dots (m-1)$  是波导支持的模数 其横向波数  $k_{x_1}$  和传播常数  $\beta_\nu$  与脊形波导的折射率  $n_r$  满足下面的色散关系

$$k_{x_1\nu}^2 + \beta_\nu^2 = k_0^2 n_r^2 \quad (5)$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (6)$$

$$k_{x_1\nu} = \frac{(\nu+1)\pi}{W_{ev}} \quad (7)$$

其中  $W_{ev}$  是考虑了边界处由 Goos-Hahnchen 位移引起每个模场横向穿透深度后的有效宽度。一般情况下, 有效宽度  $W_{ev}$  可用基模的有效宽度  $W_{e0}$  近似, 为了简单起见用  $W_e$  表示, 即:

$$W_{ev} \approx W_e = W_M + (\lambda_0/\pi) (1/n_r)^{2\sigma} (n_r^2 - 1)^{-1/2} \quad (8)$$

对 TE 偏振模  $\sigma=0$ , 对 TM 偏振模  $\sigma=1$ 。由于  $k_{x_1\nu}^2 \ll k_0^2 n_r^2$ , 由(5)~(7)式并用二项式展开可得传播常数

$$\beta_\nu \approx k_0 n_r - \frac{(\nu+1)\pi\lambda_0}{4n_r W_e^2} \quad (9)$$

由此可知, 传播常数  $\beta_\nu$  与模数  $\nu$  近似成二次关系, 且不同波长的传播常数也不同。为了后面设计方便, 这里定义两个最低级模  $\nu=0, 1$  的循环长度  $L_\pi$  为

$$L_\pi \cong \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} = \frac{4n_r W_e^2}{3\lambda_0} \quad (10)$$

则可得

$$(\beta_0 - \beta_\nu) = \frac{\nu(\nu+2)\pi}{2L_\pi} \quad (11)$$

为了更加明显清楚, 略去(4)式中的时间因子  $\exp(j\omega t)$ , 并以基模的相作为求和的共同因子, 则场分布  $\Psi(x_1, x_2, x_3)$  变为

$$\Psi(x_1, x_2, x_3) = \sum_{\nu=0}^{m-1} C_\nu \psi_\nu(x_1, x_2) \exp[i(\beta_0 - \beta_\nu)x_3] \quad (12)$$

将(11)式代入可得  $x_3+L$  处的场分布为

$$\Psi(x_1, x_2, x_3+L) = \sum_{\nu=0}^{m-1} C_\nu \psi_\nu(x_1, x_2) \exp\left[i\frac{\nu(\nu+2)\pi}{3L_\pi}(x_3+L)\right] \quad (13)$$

由此可知,  $\Psi(x_1, x_2, x_3+L)$  是  $\Psi(x_1, x_2, x_3)$  在  $x_3+L$  处的象, 取决于模的激发系数  $C_\nu$  和模的相因子特性

$$\exp\left[i\frac{\nu(\nu+2)\pi}{3L_\pi}(x_3+L)\right] \quad (14)$$

从而得到在  $x_3+L$  处形成  $x_3$  处象的条件是

$$L = p(3L_\pi) \quad p = 0, 1, 2, \dots \quad (15)$$

## 4 设计

### 4.1 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 脊形波导的设计

Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> WDM 是在 Si 衬底上生长 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 应变合金层形成的 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>/Si 结构。由于 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 合金层的晶格常数与 Ge 含量  $x$  有关, 且于 Si 的晶格常数不同, 因而 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>/Si 是一种典型的晶格失配结构体系, Ge 含量  $x$  越大, 晶格失配率越大。为了减小 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>/Si

界面间的失配位错,就必须选用较小的 Ge 含量,并使 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 合金层的厚度控制在产生失配位错的最大临界厚度之内 由于用作光波导的 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 合金的  $x = 15\%$ ,因而这里选取  $x = 0.04$ ,则应变 Si<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub> 合金层的临界厚度为  $6.5\mu\text{m}$ <sup>[20]</sup>. 由单模波导的内脊高  $h > 4\lambda$  可得,传播  $1.3\mu\text{m}$  和  $1.55\mu\text{m}$  波长光的  $h (= 2b\lambda)$  应大于  $6.2\mu\text{m}$ ,又要小于临界厚度  $6.5\mu\text{m}$ ,从而选取  $h = 6.35\mu\text{m}$ . 图 2(a)、(b)分别是  $\lambda = 1.3\mu\text{m}$  和  $1.55\mu\text{m}$  时  $a/b$  与  $b$  的关系 图中给出了  $r = 0.5, 0.8$  两种值的情况 为了方便,下面以  $r = 0.5$  为例,则对应的腐蚀深度为  $h = 3.175\mu\text{m}$ . 由对应于  $\lambda = 1.3\mu\text{m}$  和  $1.55\mu\text{m}$  的  $a/b$  应分别小于  $1.14\mu\text{m}$  和  $1.2\mu\text{m}$  可确定出脊宽  $w = 2.5\mu\text{m} (< 2a\lambda_{c.3} = 2.964\mu\text{m})$ .

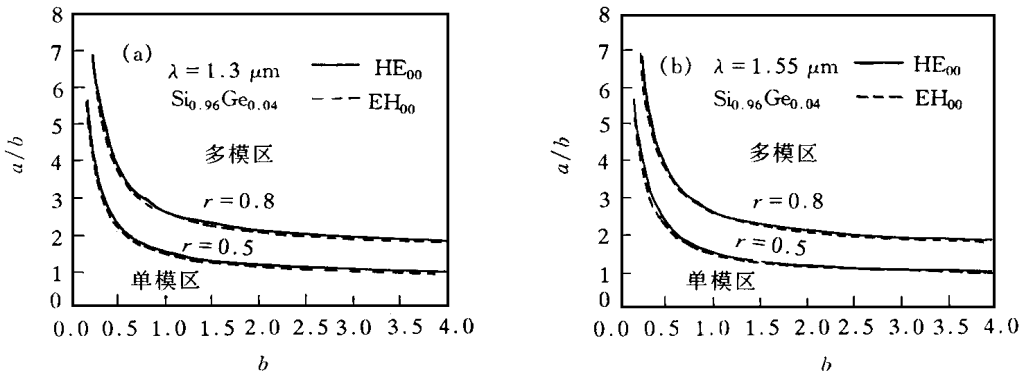


图 2 SiGe 脊形波导的  $a/b$  与  $b$  关系  
(a)  $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ , (b)  $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ .

### 4 2 MMI 区的设计

WDM 的核心部分是 MMI 区,在波导的内脊高和腐蚀深度一定的情况下,耦合区宽度 ( $W_M$ ) 应大于  $2w (= 5\mu\text{m})$ ,从而由 (8) 式知  $w_c$  应大于  $5.148\mu\text{m}$ . 考虑到  $w_c$  太大时 MMI 区的长度  $L_M$  也很大,不宜于单片集成,因而选取  $w_c = 8.148\mu\text{m}$ ,则耦合区宽度  $W_M = 8\mu\text{m}$ . 另外,从图 (2) 可知,当  $W_M = 8\mu\text{m}$ ,  $a/b$  已在多模区,这正好满足了 WDM 的多模干涉条件. 在 MMI 区,不同模的传播常数随波长的不同而不同,因而各模具有不同的相速度,从而可将  $1.3\mu\text{m}$  和  $1.55\mu\text{m}$  波长的光干涉所成的象分别经直通波导和交叉波导而分开输出 其对比度 (Contrast- $C$ ) 和插入损耗 (Insertion Loss- $L_i$ ) 分别为<sup>[13]</sup>

$$C = 10\lg_{10}(P_1/P_2) \tag{16}$$

$$L_i = -10\lg_{10}(P_i/P_i) \tag{17}$$

其中  $P_1$  和  $P_2$  分别是波长为  $1.3\mu\text{m}$  的光在波导的直通和交叉输出端的强度,或波长为  $1.55\mu\text{m}$  的光在波导直通和交叉端的输出的强度;  $P_i$  是输入的强度

由于不同波长的模数具有相差比较大的传播速度,因而其最小循环周期  $L_{\pi\lambda_1}$  和  $L_{\pi\lambda_2}$  也不同,它们和 MMI 区的耦合长度之间有关系式

$$L_M = pL_{\pi\lambda_1} = (p + q)L_{\pi\lambda_2} \tag{18}$$

其中  $p$  是正整数;  $q$  是奇数 为了得到尽可能短的耦合长度,文献 [14] 选择了  $p = 2, q = 1$ ,  $L_{\pi\lambda_1}/L_{\pi\lambda_2}$  为 1.5 本文经研究发现,通过选择比,还可以使器件的长度进一步缩小 这一结果可从图 3 看出

由 (10) 式计算得到,在  $W_M = 8\mu\text{m}$  时,对应于  $\lambda = 1.3\mu\text{m}$  和  $\lambda = 1.55\mu\text{m}$  波长光的最小

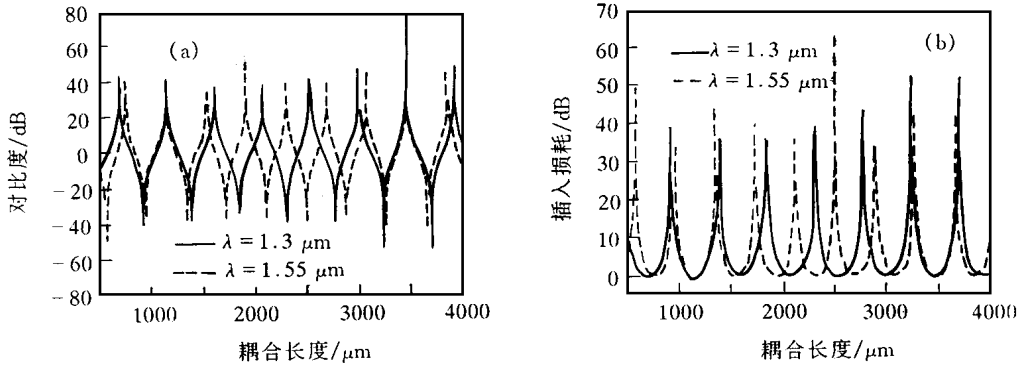


图 3  $W_M = 8\mu\text{m}$  时 WDM 的对比度(a)和插入损耗(b)

循环周期分别为  $L_{\pi\lambda_1} = 230.33\mu\text{m}$  和  $L_{\pi\lambda_2} = 191.53\mu\text{m}$ , 其比值为 1.2, 因而得到  $p = 5, q = 1$ . 从而由 (18) 式得到最佳耦合长度  $L_M = 1150\mu\text{m}$ . 图 4 是输出与输入端的光强之比随耦合区长度的变化关系 图 5(a)、(b) 分别是最佳耦合长度  $L_M = 1150\mu\text{m}$  时的对比度和插入损耗 由图 4 和图 5 可看出, 在  $L_M = 1150\mu\text{m}$  时, 这种结构的器件不但具有最大的输出与输入光强之比, 而且对  $1.3\mu\text{m}$  和  $1.55\mu\text{m}$  波长的光具有 40dB 以上的对比度和小于  $4.0 \times 10^{-3}$  dB 的插入损耗

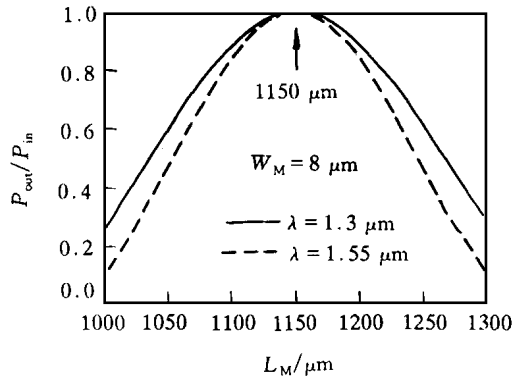


图 4 输出与输入端的光强之比随耦合区长度的变化关系

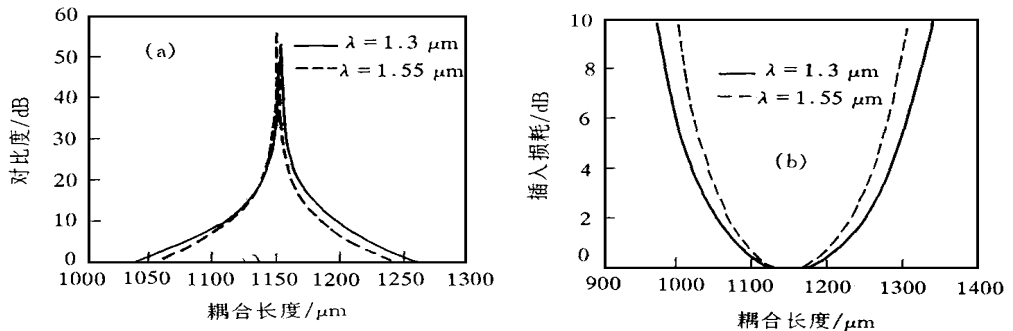


图 5 最佳耦合长度  $L_M = 1150\mu\text{m}$  时 WDM 的对比度(a)和插入损耗(b)

### 5 结论

利用多模干涉原理, 经详细的理论分析, 设计出了适用于光通信波长  $1.3\mu\text{m}$  与  $1.55\mu\text{m}$  的一种新型导波 Si 基 SiGe 波分复用器 其输入和输出端单模波导的内脊高为  $6.35\mu\text{m}$ , 腐蚀深度为  $3.175\mu\text{m}$ , 脊宽为  $2.5\mu\text{m}$ . 在多模干涉耦合区宽度  $W_M$  为  $8\mu\text{m}$  时最佳耦合长度  $L_M$

等于  $1150\mu\text{m}$ 。这种波分复用器的尺寸小, 制作工艺简单, 易于实现 Si 基光电子器件的单片集成和满足光纤通信系统大容量的需要。利用模的传播分析法对其传输特性进行研究得到, 这种结构的波分复用器对  $1.3\mu\text{m}$  和  $1.55\mu\text{m}$  波长的光具有 40dB 以上的对比度和小于  $4.0 \times 10^{-3}$  dB 的插入损耗。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] T. Kitagawa, K. Hattori, Y. Hibino *et al* , Proc ECOC, 1992, 907.
- [ 2 ] T. Negami, H. Haga and S. Yamamoto, Appl Phys Lett , 1989, **54**(12): 1080
- [ 3 ] A. Tervonen, P. Poyhonen, S. Honkanen *et al* , IEEE Photon Technol Lett , 1991, **3**(6): 516
- [ 4 ] N. Goto and G. L. Yip, Electron Lett , 1990, **26**(2): 102
- [ 5 ] F. Xiang and G. L. Yip, IPR Tech. Dig. , 1994, **3**: 130
- [ 6 ] F. Xiang and G. L. Yip, J. Lightwave Technol , 1996, **14**(7): 1690
- [ 7 ] 李宝军, 李国正, 刘恩科, 半导体学报, 1997, **18**(4): 281.
- [ 8 ] 李宝军, 李国正, 刘恩科, 半导体光电, 1997, **18**(5): 297.
- [ 9 ] G. M. Berry and S. V. Burke, Opt Quantum Electron , 1995, **27**: 921.
- [ 10 ] L. B. Soldano and E. C. M. Pennings, J. Lightwave Technol , 1995, **13**(4): 615
- [ 11 ] K. C. Lin and W. Y. Lee, Electron Lett , 1996, **32**(14): 1259
- [ 12 ] P. A. Besse, M. Bachmann, H. Melchior *et al* , J. Lightwave Technol , 1994, **12**(6): 1004
- [ 13 ] C. F. Janz, M. R. Paam, B. P. Keyworth *et al* , IEEE Photon Technol Lett , 1995, **7**(9): 1037.
- [ 14 ] M. R. Paam, C. F. Janz, R. I MacDonald *et al* , IEEE Photon Technol Lett , 1995, **7**(10): 1180
- [ 15 ] S. F. Pesarcik, G. V. Treyz, S. S. Iyer *et al* , Electron Lett , 1992, **28**(2): 159.
- [ 16 ] Y. M. Liu and P. R. Prucnal, Electron Lett , 1992, **28**(15): 1434
- [ 17 ] R. A. Mayer, K. H. Jung, T. Y. Hsieh *et al* , Appl Phys Lett , 1991, **58**(24): 2744
- [ 18 ] Y. Gao, G. Z. Li, X. D. Liu *et al* , Electron Lett , 1995, **31**(20): 1740
- [ 19 ] R. A. Soref, J. Schmidtchen and K. Petemann, IEEE J. Quantum Electron , 1991, **27**(8): 1971.
- [ 20 ] 李宝军, 刘恩科, 李国正, 光学学报, 1997, **17**(12): 1718

## Guide-Wave $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ Wavelength Demultiplexer Based on Multimode Interference

Li Baojun, Li Guozheng, Liu Enke

(Department of Microelectronics Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Received 5 April 1997, revised manuscript received 6 September 1997

**Abstract** A systematical analysis and design have been made for  $1.3\mu\text{m}$  and  $1.55\mu\text{m}$   $\text{Si}_{0.96}\text{Ge}_{0.04}/\text{Si}$  wavelength division multiplexer based on the self-imaging principle of multimode interference. Using the modal propagation analysis, transmission characteristics of the device are investigated. The results show that, at the coupler width of  $8\mu\text{m}$  and the optimum coupler length of  $1150\mu\text{m}$ , the contrast of this device is as higher as 40dB, and the insertion loss is less than  $4.0 \times 10^{-3}$  dB.

EEACC: 6150C, 5230, 1320