

1.30 μm /1.55 μm SiGe 多模干涉滤波器*

李宝军^{1), 2)} 李国正²⁾ 刘恩科¹⁾ 王 迅¹⁾

1), 复旦大学应用表面物理国家重点实验室, 上海 200433
2), 西安交通大学微电子工程系, 西安 710049

摘 要 用多模干涉原理分析和设计了光通信波长(1.30 μm ~ 1.55 μm)的 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 滤波器, 并用模的传播分析方法对其传输特性进行了研究。结果发现, 在 Ge 含量 $x = 0.04$ 时, 干涉区的脊高和宽度分别为 6.35 μm 和 8 μm 。如果多模干涉区长度 $L_M = 2302.5 \mu\text{m}$, 可滤 1.30 μm 而通 1.55 μm 的波长。且具有 31 dB 的对比度和 0.01 dB 的插入损耗; 如果多模干涉区长度 $L_M = 2512.5 \mu\text{m}$, 可滤 1.55 μm 而通 1.30 μm 的波长。具有 16 dB 的对比度和 0.09 dB 的插入损耗。

关键词 滤波器, 多模干涉, SiGe。

1 引 言

滤波器是波分复用光通信系统中的重要器件, 它可在多通道波分复用网中对波长进行选择滤波。目前, 关于滤波器的研制趋向于用能够和其它光电子器件进行单片集成的半导体材料制作^[1, 2]。同时主要集中在用于 1.30 μm 和 1.55 μm 光通信波长的高性能滤波器^[1~3]。近年来, 多模干涉(Multi-Mode Interference-MMI)在集成光学中有了迅速的应用^[4~6]。用多模干涉制作的器件有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高性能滤波器指明了新的探索途径。另外, 在 Si 基 SiGe 光波导^[7~9]和 SiGe/Si 无间距定向耦合器^[10, 11]方面的研制成功, 使得用多模干涉自成像原理设计和研制既能满足 1.30 μm 和 1.55 μm 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高性能 Si 基多模干涉滤波器有了坚实的基础。为此, 本文用多模干涉原理分析和设计了 1.30 μm 和 1.55 μm 波长的 Si 基 SiGe 滤波器, 并对其传输和滤波特性进行分析, 为实验制作奠定了良好的基础。

2 基本结构

图 1(a) 是 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 脊形波导滤波器的结构示意图, 它是在 Si(100) 衬底上生长 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 层形成的。图中 w 为脊宽, h 为内脊高, h' 为腐蚀深度。图 1(b) 是其顶视图, W_M 和 L_M 分别为多模干涉区的宽度和耦合长度。当 1.30 μm 和 1.55 μm 波长的光由滤波器的一端耦合入基模

* 国家自然科学基金(69636040)重点资助项目。

收稿日期: 1997-04-05; 收到修改稿日期: 1997-09-01

后, 该基模传输到多模干涉区时, 因波导宽度突然增大, 其场宽也必然增大。由于增大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, 于是这些模便在多模干涉区发生干涉。由于各种模的传播常数不同, 因而存在着相位差。如果多模干涉区的长度 L_M 满足一定条件, 则可将 1.30 μm 或 1.55 μm 波长的光滤掉而让 1.55 μm 或 1.30 μm 波长的光通过。

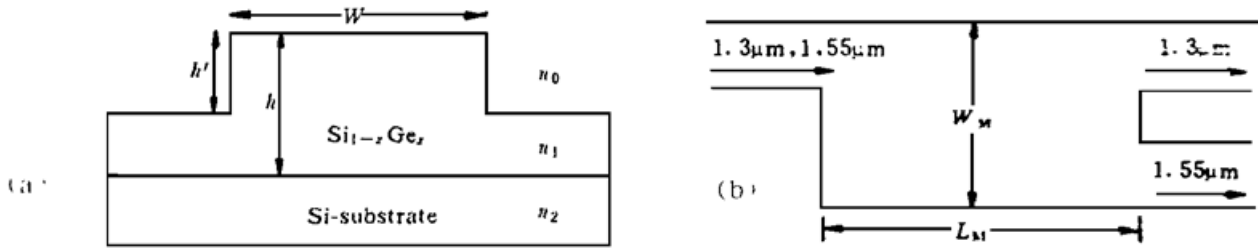


Fig. 1 Basic scheme of Si_{1-x}Ge_x rib waveguide filter. (a) Cross-section, (b) Top view

3 理 论

3.1 Si_{1-x}Ge_x 脊形波导

滤波器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。为了让滤波器的输入和输出端只传输单模光, 其横向和纵向结构尺寸必须满足单模条件。根据文献[12], 当脊高 $h > 4\lambda$ 时, 单模脊形波导的脊宽 $w (= 2a\lambda)$ 与内脊高 $h (= 2b\lambda)$ 之比应满足:

$$\frac{a}{b} \leq \left[\frac{q + 4\pi b}{4\pi b} \right] \frac{1 + 0.3 \sqrt{[(q + 4\pi b)/(q + 4\pi r b)]^2 - 1}}{\sqrt{(q + 4\pi b)/(q + 4\pi r b)]^2 - 1}} \quad (1)$$

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

对 HE 模, $\gamma_{0,2} = 1$; 对 EH 模, $\gamma_{0,2} = (n_{0,2}/n_1)^2$ 。式中 a 和 b 分别为脊宽和脊高因子, r 为腐蚀深度因子, λ 为自由空间的光波长。

3.2 多模干涉区的场分布

在多模干涉区光场分布 $\Psi(x, y, z)$ 可写为二维标量亥姆霍兹(Helmholtz)波动方程

$$\partial^2 \Psi / \partial x^2 + \partial^2 \Psi / \partial y^2 + [2\pi n(x, y) / \lambda]^2 \Psi = \beta^2 \Psi \quad (3)$$

$$\Psi(x, y, z) = \sum_{\nu=0}^{m-1} C_\nu \Psi_\nu(x, y) \exp [j(\alpha t - \beta_\nu z)] \quad (4)$$

式中 x 表示横向, y 表示纵向, z 为传播方向, C_ν 为场的激发系数, $\Psi_\nu(x, y)$ 为模场, $n(x, y)$ 为折射率, β_ν 为模的传播常数, $\nu = 0, 1, 2, \dots (m - 1)$ 为波导支持的模数。其横向波数 $k_{x\nu}$ 和传播常数 β_ν 与脊形波导的折射率 n_r 满足下面的色散关系

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

$$k_0 = 2\pi/\lambda_0, \quad k_{x\nu} = (\nu + 1)\pi/W_{ev} \quad (6)$$

式中 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:

$$W_{ev} \approx W_e = W_M + (\lambda_0/\pi) (n_0/n_r)^{2\sigma} (n_r^2 - n_0)^{-1/2} \quad (7)$$

对 TE 偏振模 $\sigma = 0$, 对 TM 偏振模 $\sigma = 1$ 。由于 $k_{x\nu}^2 \ll k_0^2 n_r^2$, 由(5)式(6)式并用二项式展开可得

$$\beta_\nu \approx k_0 n_r - (\nu + 1)^2 \pi \lambda_0 / 4 n_r W_e^2 \quad (8)$$

由此可行, 传播常数 β_ν 与模数 ν 近似成二次关系, 且不同的波长其传播常数也不同。为了后面设计方便, 定义两个最低级模 $\nu = 0, 1$ 的循环长度 L_π 为

$$L_\pi \cong \pi/(\beta_0 - \beta_1) \approx 4n_r W_c^2/3\lambda_0 \tag{9}$$

则可得 $(\beta_0 - \beta_\nu) \approx \nu(\nu + 2)\pi/3L_\pi$ (10)

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 $\Psi(x, y, z)$ 变为

$$\Psi(x, y, z) = \sum_{\nu=0}^{m-1} C_\nu \Psi_\nu(x, y) \exp[j(\beta_0 - \beta_\nu)z] \tag{11}$$

并将(10)式代入可得 $z + L$ 处的场分布为

$$\Psi(x, y, z + L) = \sum_{\nu=0}^{m-1} C_\nu \Psi_\nu(x, y) \exp[j \frac{\nu(\nu+2)\pi}{3L_\pi}(z + L)] \tag{12}$$

由此可知, $\Psi(x, y, z + L)$ 是 $\Psi(x, y, z)$ 在 $z + L$ 处的像, 取决于模的激发系数 C_ν 和模的相因子特性

$$\exp[j\nu(\nu + 2)\pi(z + L)/3L_\pi] \tag{13}$$

从而得到在 $z + L$ 处形成 z 处象的条件是

$$L = p(3L_\pi), \quad p = 0, 1, 2, \dots \tag{14}$$

4 设 计

4.1 Si_{1-x}Ge_x 脊形波导的设计

Si_{1-x}Ge_x 滤波器是在 Si 衬底上生长 Si_{1-x}Ge_x 应变合金层形成的 Si_{1-x}Ge_x/Si 结构。由于 Si_{1-x}Ge_x 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_{1-x}Ge_x/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_{1-x}Ge_x/Si 界面间的失配位错, 就必须选用较小的 Ge 含量, 并使 Si_{1-x}Ge_x 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_{1-x}Ge_x 合金的 $x \leq 15\%$, 因而这里选取 $x = 0.04$, 则应变 Si_{1-x}Ge_x 合金层的临界厚度为 $6.5 \mu\text{m}$ ^[13]。由于单模波导的内脊高应大于 4λ , 从而得到传播 $1.30 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 波长光的 $h = 2b\lambda$ 应大于 $6.2 \mu\text{m}$ 。考虑到单模波导的内脊高不能大于临界厚度 $6.5 \mu\text{m}$, 因而选 $h = 6.35 \mu\text{m}$ 为宜。图 2(a)、图 2(b) 分别为 $\lambda = 1.30 \mu\text{m}$ 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, 以 $r = 0.5$ 为例, 则腐蚀深度 $h' = 3.175 \mu\text{m}$, 对应于 $\lambda = 1.30 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 的 b 分别为 2.442 和 2.048 。要传播单模波, 从图 2(a), 图 2(b) 分别得到对应于 $\lambda = 1.30 \mu\text{m}$ 和 $1.55 \mu\text{m}$ 的 a/b 应分别小于 1.14 和 1.2 , 从而确定出脊宽 $W = 2.5 \mu\text{m} (< 2a\lambda_{1.3} = 2.946 \mu\text{m})$ 。

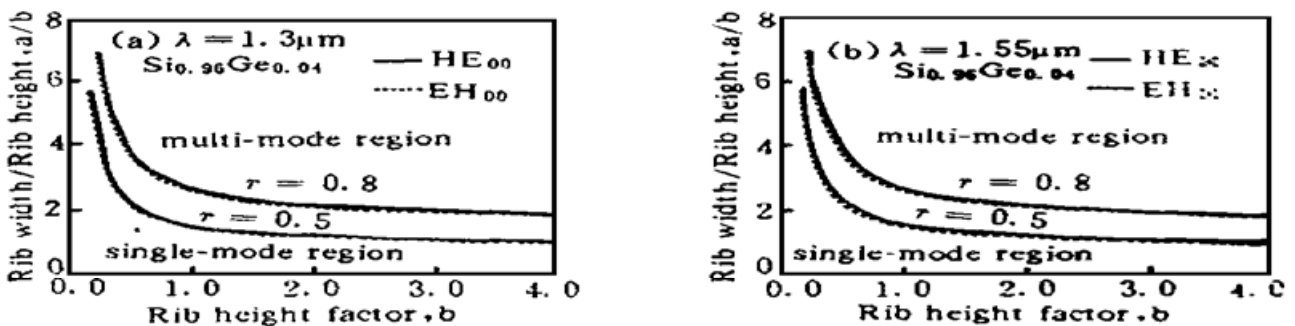


Fig. 2 a/b versus b of SiGe rib waveguide; (a) $\lambda = 1.30 \mu\text{m}$, (b) $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$

4.2 多模干涉区的设计

滤波器的核心部分是多模干涉区, 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(7)式知 W_c 应大于 $5.148 \mu\text{m}$ 。考虑到 W_c 太大时多模干涉区的长度 L_M 也很大, 不宜于大规模集成, 因而选取 $W_c = 8 \mu\text{m}$ 。另外, 从图 2 可知, 当脊宽为 $8 \mu\text{m}$ 时, a/b 已在多模区, 这正好满足了滤波器的多模干涉条件。在多模干涉区, 不同模的传播常数随波长的不同而不同, 各模具有不同的相速度, 因而可将 $1.55 \mu\text{m} \sim 1.30 \mu\text{m}$ 光滤掉而让 $1.30 \mu\text{m} \sim 1.55 \mu\text{m}$ 波长的光分别经直通波导和交叉波导输出, 从而达到滤波的作用。对于多模干涉器件, 其对比度 (Contrast- C) 和插入损耗 (Insertion Loss- L_1) 分别为^[14]

$$C = 10 \log_{10}(P_1/P_2), \quad L_1 = -10 \log_{10}(P_1/P_i) \quad (15)$$

式中 P_1 和 P_2 分别是波长为 $1.30 \mu\text{m}$ 的光在波导的直通和交叉输出端的强度、和波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 的光在波导交叉和直通端的输出的强度, P_i 为输入的强度。图 3 是经理论模拟所得到的对比度和插入损耗与耦合长度的周期关系。

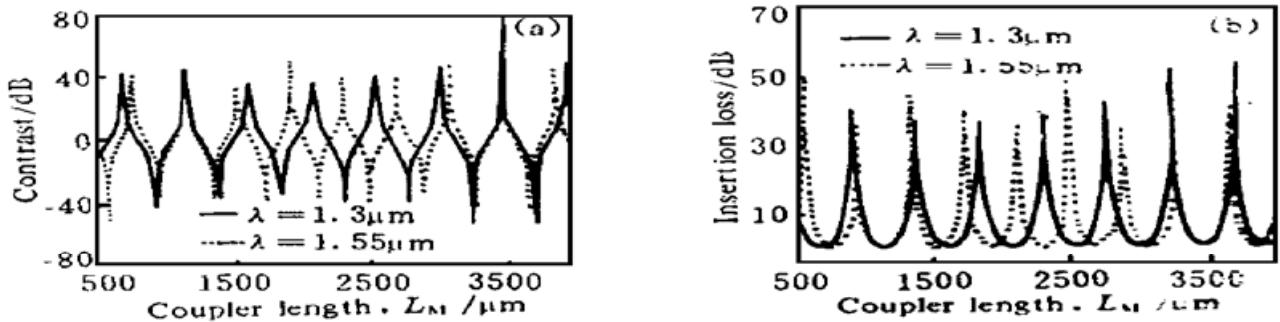


Fig. 3 (a) Contrast and (b) Insertion loss of the filter at $W_M = 8 \mu\text{m}$

由图 3 的周期关系可看出, 在耦合长度约 $2400 \mu\text{m}$ 左右, 两波长不但具有较强的对比度和插入损耗, 而且具有较大的间距。图 4 是在 $2200 \mu\text{m} \sim 2600 \mu\text{m}$ 间隔内的对比度和插入损耗。由图 4 可知, 选取 $L_M = 2302.5 \mu\text{m}$ 为滤波器的耦合长度, 可滤掉 $1.30 \mu\text{m}$ 而让 $1.55 \mu\text{m}$ 波长的光通过, 且具有 31 dB 的对比度和 0.01 dB 的插入损耗。如果选取 $L_M = 2512.5 \mu\text{m}$ 为滤波器的耦合长度, 可滤掉 $1.55 \mu\text{m}$ 而让 $1.30 \mu\text{m}$ 波长的光通过, 其对比度和插入损耗分别为 16 dB 和 0.09 dB 。

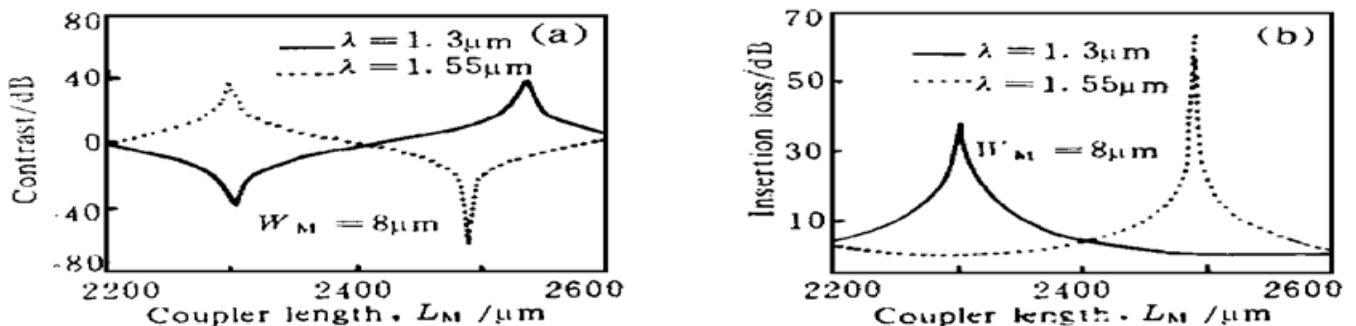


Fig. 4 (a) Contrast and (b) Insertion loss of the filter at $W_M = 8 \mu\text{m}$ for operating wavelength $1.3 \mu\text{m}$ and $1.55 \mu\text{m}$

结 论 用多模干涉原理, 经详细的理论分析设计出了适用于 $1.30 \mu\text{m} \sim 1.55 \mu\text{m}$ 光通信波长的一种新型导波 Si 基 SiGe 滤波器。这种滤波器的尺寸小, 制作工艺简单, 易于实现 Si 基光电子器件的单片集成。通过对其传输特性的分析得到: 通 $1.55 \mu\text{m}$ 、滤 $1.30 \mu\text{m}$ 波长滤波器的干涉区长度 $L_M = 2302.5 \mu\text{m}$, 对比度和插入损耗分别为 31 dB 和 0.01 dB ; 通 $1.30 \mu\text{m}$,

滤 $1.55 \mu\text{m}$ 波长滤波器的干涉区长度 $L_M = 2512.5 \mu\text{m}$, 对比度和插入损耗分别为 16 dB 和 0.09 dB。这两种长度滤波器的干涉区宽度均为 $8 \mu\text{m}$, 波导的内脊高为 $6.35 \mu\text{m}$ 。

参 考 文 献

- [1] S. -K. Han, R. V. Ramaswamy, R. F. Tavlykaev, Narrow-band vertically stacked filters in In-GaAlAs/InP at $1.5 \mu\text{m}$. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1) : 77~ 83
- [2] T. Wongcharoen, B. M. A. Riziaur, K. T. V. Grattan, Accurate characterization of optical filter with two-dimensional confinement. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(11) : 2596~ 2603
- [3] M. Iida, H. Asakura, A computer controlled narrow bandpass optical tunable filter using a Fourier diffraction grating in the range of $1.3 \sim 1.55 \mu\text{m}$. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(12) : 2343~ 2348
- [4] G. M. Berry, S. V. Burke, Analysis of optical rib self-imaging multimode interference (MMI) waveguide devices using the discrete spectral index method. *Opt. and Quant. Electron.*, 1995, **27** : 921~ 934
- [5] L. B. Soldano, E. C. M. Pennings, Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: Principles and applications. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(4) : 615~ 627
- [6] K. -C. Lin, W. -Y. Lee, Guide-wave $1.3/1.55 \mu\text{m}$ wavelength division multiplexer based on multi-mode interference. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(14) : 1259~ 1261
- [7] 李宝军, 李国正, 刘恩科, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ 光波导及其器件研究的最新进展. 半导体光电, 1997, **18**(3) : 152~ 156
- [8] S. F. Pesarcik, G. V. Treyz, S. S. Iyer *et al.*, Silicon germanium optical waveguides with 0.5 dB/cm losses for single mode fiber optic systems. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(2) : 159~ 161
- [9] Y. M. Liu, P. R. Prucnal, Deeply-etched single mode GeSi rib waveguides for silicon-based optoelectronic integration. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(15) : 1434~ 1435
- [10] R. A. Mayer, K. H. Jung, T. Y. Hsieh *et al.*, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ optical directional coupler. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**(24) : 2744~ 2745
- [11] 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
- [12] R. A. Soref, J. Schmidtchen, K. Petermann, Large single-mode rib waveguides in GeSi-Si and Si-on-SiO₂. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1991, **QE-27**(8) : 1971~ 1974
- [13] 李宝军, 李国正, 刘恩科, $1.55 \mu\text{m}$ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 光波导与 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ MQW 探测器集成的优化设计. 光学学报, 1997, **17**(12) : 1718~ 1723
- [14] C. F. Janz, M. R. Paiam, B. P. Keyworth *et al.*, Bent waveguide couplers for (de)multiplexing of arbitrary broadly-separated wavelengths using two-mode interference. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(9) : 1037~ 1039

1.30 $\mu\text{m}/1.55 \mu\text{m}$ SiGe Filters Based on Multimode Interference

Li Baojun^{1), 2)} Li Guozheng²⁾ Liu Enke²⁾ Wang Xun¹⁾

1), Surface Physics Laboratory, Fudan University, Shanghai 200433
2), Department of Microelectronics Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

(Received 5 April 1997; revised 1 September 1997)

Abstract A systematical analysis and design have been made for $1.30 \mu\text{m}/1.55 \mu\text{m}$ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ filters based on multi-mode interference. Using the mode propagation analysis, transmission characteristics of the device were investigated. The results show that: 1) for $1.30 \mu\text{m}$ filter, the optimum coupler length is $2302.5 \mu\text{m}$, and the contrast and insertion loss are 31 dB and 0.01 dB, respectively; 2) for $1.55 \mu\text{m}$ filter, the optimum coupler length is $2512.5 \mu\text{m}$, and the contrast and insertion loss are 16 dB and 0.09 dB, respectively. For both of the filters, the Ge content x , rib height, and interference width are 0.04, $6.35 \mu\text{m}$, and $8 \mu\text{m}$, respectively.

Key words filter, multi-mode interference, SiGe.