

$\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 异质结大截面脊形 BOA 型 光开关的模型分析及设计

赵策洲 刘恩科 高 勇

(西安交通大学电子工程系 西安 710049)

摘要 本文提出了一种简便可行的 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 异质结无间距定向耦合光开关(BOA 型——Bifurcation Optique Active)模型分析方法. 该方法采用等离子体色散效应分析了这种光开关的电学调制机理; 采用异质结超注入原理分析了开关的电学性质; 并根据大截面单模脊形波导理论和上述分析, 设计了利用双模干涉机制工作的 $\text{Ge}_{0.1}\text{Si}_{0.9}/\text{Si}$ 异质结 BOA 开关的结构参数和电学参数.

EEACC: 4130, 4140, 4150, 2530B

1 前言

随着 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 应变层超晶格技术的发展, 已经研制成功多种不同结构的 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 应变层超晶格红外光探测器件. 又发展了 Si 上异质外延生长 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 层和化学气相淀积 (CVD) $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 层, 在其中构成损耗较小的光波导 (传输损耗 $\leq 2.5 \pm 1\text{dB/cm}$, 在波长为 $1.3\mu\text{m}$ 时)^[1-3], 并用这些光波导制作导波光器件^[4-7]. $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 异质结器件工艺与硅工艺良好的兼容性以及硅上生长 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 技术的发展, 无疑使得利用最为成熟的硅加工工艺和集成技术实现锗硅光电单片集成和光子集成成为可能. 由于在光电开关器件中, 无间距定向耦合光开关(BOA)利用了最大的模色散($\Delta\beta$), 而不要求特殊的制造长度和长度范围, 可以得到很低的串音度(理论上低于 -40dB). 因此目前分别在 GaAs, Si 和 Si 中掺 Ge 材料上研制成了这种光开关^[7-9]. 本文针对 $1.3-1.6\mu\text{m}$ 波长的 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 异质结 BOA 型光开关进行了理论分析, 并考虑 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 应变层临界厚度的影响, 根据大截面单模脊形波导理论, 设计了高组分 ($x=0.1$) $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 异质结光开关的结构.

2 原理及分析

对于双模干涉机制的 BOA 型光开关, 当光由一端耦合入基模后, 该基模 A 传输到单模

赵策洲 男, 1964 年生, 副教授, 目前主要从事微电子技术和集成光学研究. 现单位: 西安电子科技大学微电子所 710071

刘恩科 男, 1930 年生, 教授, 目前主要从事微电子技术和集成光学研究
1994 年 1 月 10 日收到初稿, 1994 年 3 月 7 日收到修改稿

波导 1 和单模波导 2 的交叉点处,此处波导宽度增大一倍,如图 1(a)所示,其场宽也必然增大,变成基模 B 。由于基模 A 和 B 不满足场的连续性条件,因此必然同时伴随着另一模式——一阶模 C 的激发。这样 $2a$ 区域中便传输着零阶模和一阶模两个模式。这两个模式之间存在传播常数差 $\Delta\beta_0 = \beta_{00} - \beta_{10}$,如果 $2a$ 区域长度 L 满足

$$\Delta\beta_0 L = \pi \quad (1)$$

则这两个模式在传播到 $2a$ 区域右端后,恰好反相,被单模波导 3 和 4 分割成图示状态,模场 B_1 和 C_1 叠加为零,仅由 4 端输出模场。但是,如果这两个模式在 $2a$ 区域内传播时,由于电子注入(如图 1(b)所示)引起等离子体色散效应^[7],使得其折射率发生变化,则会引起这两个导模的附加传播常数 $\Delta\beta_{00}$ 和 $\Delta\beta_{01}$,若

$$(\Delta\beta_{00} + \Delta\beta_{01} + \Delta\beta_0)L = 0 \text{ 或 } 2\pi \quad (2)$$

则模场将由 3 端输出,4 端的模场在这种情况下叠加为零。这就是利用双模干涉机制的 BOA 型光开关的工作原理。

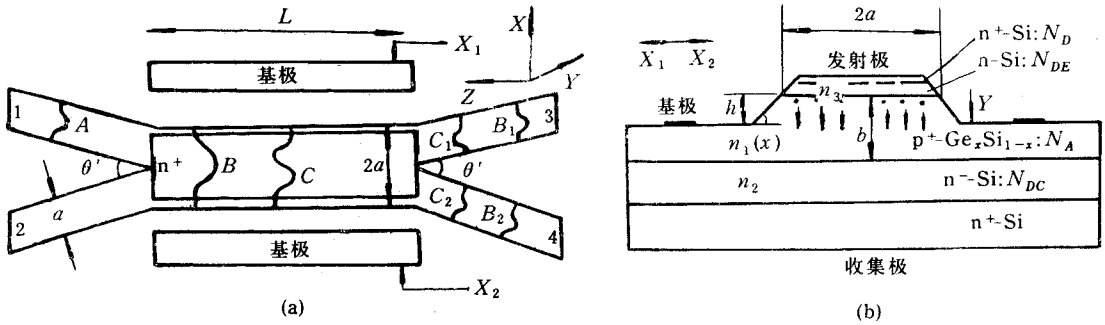


图 1 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 异质结 BOA 型开关结构图

(a) BOA 开关工作原理 (b) BOA 开关调制器截面图

目前在 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 异质结上实现光电调制主要利用等离子体色散效应^[6,7]。最简单的方法是利用异质结将电子由宽带硅注入到窄带锗硅波导中,如图 1(b)所示,从而引起波导中折射率和导模传播常数发生变化,即 $2a$ 区域内 mn 阶模附加传播常数 $\Delta\beta_{mn}$ 为^[10]

$$\Delta\beta_{mn} = \frac{k_0^2 n_1(x) \Delta n_1(x)}{\Delta\beta_{mn} b} \cdot \frac{F_1 + F_2}{F_3 + F_4} \quad (3)$$

式中 $n_1(x)$ 为波导芯折射率,自变量 x 为异质结中锗的组分, $\Delta n_1(x)$ 为电子注入引起的波导芯折射率变化,且 $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ 为真空波数, λ_0 为真空波长, b 为脊高,对于 E_{mn}^+ 模有

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= b^2/2 - [\cos(2G_4) - \cos(2G_2b + 2G_4)]/4G_2^2 \\ F_2 &= b[\sin(2G_2b + 2G_4)]/2G_2 \\ F_3 &= b - (\cos^2 G_4)/G_3 + [\cos^2(G_2b + G_4)]/G_1 \\ F_4 &= [\sin(2G_2b + 2G_4) - \sin(2G_4)]/2G_2 \\ G_1^2 &= k_0^2[n_1^2(x) - n_2^2] - G_2^2 \\ G_3^2 &= k_0^2[n_1^2(x) - n_3^2] - G_2^2 \\ \text{tg} G_4 &= -G_3/G_2 \\ \text{tg}(G_4 + G_2b) &= G_1/G_2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

可以假设锗硅合金中等离子体色散性质与单晶硅相似^[7], 因此可推导出:

$$\Delta n_1(x) = -1.274 \times 10^{-21} \lambda_0^2 \Delta N_E / n_1(x) \quad (5)$$

式中 ΔN_E 为导波层 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 电子浓度的平均改变量, 单位为 cm^{-3} , λ_0 单位为 μm .

应变 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 合金的折射率 $n_1(x)$ 可通过大量的实验结果得到经验公式^[1,11], 当 Ge 的组分 $x \leq 0.2$ 时,

$$n_1(x) = n_2 + 0.27x \quad (6)$$

式中 n_2 是无应变衬底硅的折射率, 如图 1(b) 所示.

异质结超注入原理^[12]是指宽带材料(如 Si)注入到窄带材料(如 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$)中的少数载流子比宽带材料本身的多数载流子(电子)还要多. 因此发射区掺杂浓度 N_{DE} 不必比基区掺杂浓度 N_A 高. 图 1(b) 实际也是一个异质结双极晶体管结构, 在发射结界面 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 异质结结构, 存在着导带的不连续性 ΔE_c 和价带的不连续性 ΔE_v . 由于无论 x 取值多大, ΔE_c ($\Delta E_c = 0.020\text{eV}$ ^[13]) 都可和 kT (T 是绝对温度, k 是玻耳兹曼常数, 室温时 $kT = 0.026\text{eV}$) 相比拟, 因此电子从 Si 中注入到 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 应变层中的行为就可用同质结的情况来近似, 即^[14]:

$$\Delta N_E(0) = [N_i^2(x) \exp(\frac{qV_{BE}}{kT})] / N_A \quad (7)$$

式中 $y=0$ 处(发射结基区一侧)的注入电子浓度, 式中 V_{BE} 是基极与发射极间的偏压, q 是电子电量, $N_i(x)$ 是 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 的本征载流子浓度. 经过推导可行 $N_i(x)$ 与硅的本征载流子浓度 $N_i(\text{Si})$ 的关系:

$$N_i = \sqrt{A(x)} N_i(\text{Si}) \exp(\frac{\Delta E_v}{2kT}) \quad (8)$$

式中 $A(x)$ 是 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 和 Si 的总有效状态密度的比值, 且 $x=0.1$ 时, 室温下 $A(x) \approx 0.5$ ^[15]; 室温下 $N_i(\text{Si}) = 1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$; $x \leq 0.5$ 时

$$\Delta E_v = 0.74x \quad (9)$$

由于可使波导芯厚度 b 远小于少数载流子(电子)的扩散长度, 因此 y 方向 $y=0-b$ 范围内注入的载流子分布(基区少子分布)可近似线性分布, 当 $V_{CE} \gg \frac{kT}{q}$ 时^[14]

$$\Delta N_E(y) = \Delta N_E(0) (1 - \frac{y}{b}) \quad (10)$$

不妨取注入的平均电子浓度 ΔN_E 为

$$\Delta N_E = \Delta N_E(h) = \Delta N_E(0) (1 - \frac{h}{b}) \quad (11)$$

由于空穴从 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 应变层中注入到 Si 中除了要克服异质结势垒外, 还要克服 ΔE_v 台阶. 因此空穴的注入作用可以忽略, 发射结电流密度 J_E 主要是电子注入电流, 当 $V_{CE} \gg \frac{kT}{q}$ 时, 经过推导可得

$$J_E = \frac{q D_n(x) N_i^2(x)}{b N_A} \exp(\frac{qV_{BE}}{kT}) \quad (12)$$

式中 $D_n(x)$ 是 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 应变层中电子的扩散常数, $D_n(x) = \frac{kT}{q} \mu_n(x)$, $\mu_n(x)$ 是应变层 $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ 的电子迁移率, 可由下式确定^[16]

$$\frac{1}{\mu_n(x)} = \frac{1}{\mu_{Si}} + \frac{1}{\mu_A} \quad (13)$$

其中 μ_{Si} 和 μ_A 分别是硅和合金对迁移率的贡献, 分别由以下两式确定^[16-17]

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Si} &= 88T_n^{-0.57} + \frac{7.4 \times 10^8 T^{-2.33}}{1 + [N_A / (1.26 \times 10^{17} T_n^{2.4})] 88T_n^{-0.146}} \\ \mu_A &= \frac{9700T^{-0.8}}{x(1-x)} \quad x \leq 0.85 \text{ 时} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中 $T_n = T/300$.

3 Si/Ge_xSi_{1-x}/Si 异质结大截面单模脊形波导截止特性分析

对于只有传输基模的脊形波导, 人们往往假设脊形截面尺寸与同材料的平面波导厚度尺寸相当^[10]; 若将平面波导的截止特性应用于该异质结脊形波导的 y 方向, 则 $x \geq 0.1$ 时, 导波层度 b 将进入亚微米量级, 而一般单模光纤的尺寸约数微米, 这样使得光从光纤到波导的耦合过程中损耗很大. 幸好这一假设并不成立^[18], 只要适当地选择波导的宽高比 a/b , 对截面数微米尺寸的波导, 只在其中传输基模也是可能的, 即大截面脊形波导的单模条件

$$\left. \begin{aligned} \frac{a}{b} &\leq 0.3 + \frac{\gamma}{\sqrt{1-\gamma^2}} \\ \gamma &\geq 0.5, \quad a \leq 10\mu\text{m} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中 $\gamma = (b-h)/b$, h 如图 2 所示.

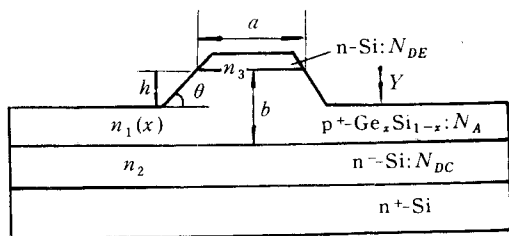


图2 Ge_xSi_{1-x}异质结脊形波导

另一方面, 由于 Ge_xSi_{1-x}/Si 应变材料是一种亚稳态材料, 是靠应变引起的能带变化来获得新的电学与光学特性; 如果 Ge_xSi_{1-x}层厚度 b 太大, 会产生失配位错来释放应力, 从而失去这种应变材料原有的有价值的特性; 同时也会导致由于位错的增多而增大波导的传输损耗, 因此必须使应变 Ge_xSi_{1-x}层小于某一临界值 b_c , 即^[19]

$$b < b_c = \frac{2.2 \times 10^{-5} [1 + \ln(2.5 \times 10^3 b_c)]}{0.042x - 7.5 \times 10^{-3}} \quad (16)$$

因此异质结构的脊形波导尺寸还受到应变 Ge_xSi_{1-x}临界厚度 b_c 的限制. 从(16)式可知, 随着 x 的增加, b_c 减小, 当 $x=0.3$ 时, $b_c=0.0215\mu\text{m}$; 当 $x=0.2$ 时, $b_c=0.17\mu\text{m}$, 当 $x=0.18$ 时, $b_c=3.7\mu\text{m}$.

4 Ge_xSi_{1-x}/Si 结构 BOA 型光开关设计举例

对于锗组分 x 为 0.1 的应变材料, 在波长为 $\lambda_0=1.32\mu\text{m}$ 时, 由于硅的本征折射率 $n_2=3.505$, 因此这时由(6)式可得 $n_1=3.532$. 在单模脊形应变 Si/Ge_{0.1}Si_{0.9}/Si 波导设计中, 可采用常规硅工艺在〈100〉晶向 n^+ -Si 衬底上外延生长 $10\mu\text{m}$ 厚的 n^- -Si, 其掺杂浓度 $N_{DC}=3 \times$

10^{16}cm^{-3} , 因此 n_2 可近似等于本征硅的折射率. 再在 n^- -Si 层上采用快速辐射加热超低压 CVD(RRH/VLR CVD)技术分别生长一层掺杂浓度为 10^{18}cm^{-3} , 锗组分 $x=0.1$, 厚度 $b=4\mu\text{m}$ (由 (16) 式确定) 的 $\text{Ge}_{0.1}\text{Si}_{0.9}$ 波导层和厚度为 $0.5\mu\text{m}$ 的 n-Si (掺杂浓度 $N_{\text{DE}}=10^{17}\text{cm}^{-3}$, 因此 $n_3=3.505$) 覆盖层. 最后在 60°C 下采用 70% 的 KOH (氢氧化钾) 各向异性腐蚀法, 腐蚀出梯形截面脊形波导, 其 $\theta=54.7^\circ$ [11], 当 $a=6\mu\text{m}$ 时, 由 (15) 式可确定 $h=1\mu\text{m}$, 从而确定出腐蚀深度为 $1.5\mu\text{m}$, 因此完全确定了该应变单模脊形波导的所有结构参数, 如图 2 所示. 接下来对 $\text{Ge}_{0.1}\text{Si}_{0.9}/\text{Si}$ 结构 BOA 形光开关进行设计.

在双模干涉区 (也就是电光调制区) 上用离子注入方式注入磷原子, 峰值深度 $\leq 0.2\mu\text{m}$, 峰值浓度 $N_{\text{D}}=10^{20}\text{cm}^{-3}$, 以便形成发射区欧姆接触, 如图 1(b) 所示. 由于梯形截面脊形波导的 E_{mn}^x 模的模方程为 [10]

$$\frac{4k_0}{R_1}[(aR_1+1)(n_1^2-R_2^2-N_{mn}^2)^{\frac{1}{2}}]-R_2\text{tg}^{-1}\left[\frac{(n_1^2-R_2^2-N_{mn}^2)^{\frac{1}{2}}}{R_2}\right]=2(m+1)\pi \quad (17)$$

$$\text{式中} \quad \left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{k_0\text{tg}\theta}{(n_1^2-n_3^2)^{-\frac{1}{2}}+(n_1^2-n_2^2)^{-\frac{1}{2}}+k_0b} \\ R_2 &= \frac{(n+1)\pi}{(n_1^2-n_3^2)^{-\frac{1}{2}}+(n_1^2-n_2^2)^{-\frac{1}{2}}+k_0b} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

N_{mn} 为 mn 阶导模的有效折射率, $n, m=0, 1, 2, \dots$ 分别为 x, y 方向上导模的阶数. mn 阶导模的传播常数 β_{mn} 与其有效折射率 N_{mn} 的关系为 $\beta_{mn}=k_0N_{mn}$, 因此 $\Delta\beta_0=\beta_{00}-\beta_{10}=k_0(N_{00}-N_{10})$. 对 (17) 式进行数值计算, 并代入 $\text{Ge}_{0.1}\text{Si}_{0.9}/\text{Si}$ 单模脊形波导的结构参数, 则对于波长 $\lambda_0=1.32\mu\text{m}$ 的红外光, 双模干涉区 E_{00}^x 模和 E_{01}^x 模的传播常数之差为 $\Delta\beta_0=3.61\times 10^{-3}\mu\text{m}^{-1}$. 因此可由 (1) 式得干涉区的长度 $L=870\mu\text{m}$. 又由 (2) 式可得实现光开关作用时, 这两个导模的附加传播常数的变化为 $\Delta\beta_{00}+\Delta\beta_{01}=-\Delta\beta_0$, 代入 (3) 式, 并联合 (4) 式, 由数值计算可得 $\text{Ge}_{0.1}\text{Si}_{0.9}/\text{Si}$ 结构 BOA 型光开关实现光开关作用所要求的波导芯折射率变化为 $\Delta n_1=-7.72\times 10^{-4}$. 因此由 (5) 式可得这时异质结注入到波导芯的平均电子浓度为 $\Delta N_{\text{E}}=1.228\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$. 又根据 (7) 到 (11) 式可得达到 ΔN_{E} 所加于异质结上的正向偏压 $V_{\text{BE}}=0.87\text{V}$. 不妨取 $V_{\text{CE}}=3\text{V}$. 最后由 (12) 至 (14) 式可得实开关作用时的电流密度为 $J_{\text{E}}=1.4\text{kA}/\text{cm}^2$. 为了最大限度地减小模式的转换和辐射损耗, 选择波导分支角 $\theta'=3-4^\circ$ [20]. 表 1 给出了 $\text{Ge}_{0.1}\text{Si}_{0.9}/\text{Si}$ 异质结 BOA 型光开关的结构参数和电学参数.

表 1 $\text{Ge}_{0.1}\text{Si}_{0.9}/\text{Si}$ 异质结 BOA 型光开关的结构参数和电学参数 (举例)

参数	$2a$	b	h	L	N_{A}	N_{DE}	N_{DC}	J_{E}	V_{BE}	θ	θ'	V_{BC}
数值	$12\mu\text{m}$	$4\mu\text{m}$	$1\mu\text{m}$	$870\mu\text{m}$	10^{18}cm^{-3}	10^{17}cm^{-3}	$3\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$	$1.4\text{k}/\text{cm}^2$	0.87V	54.7°	$3-4^\circ$	3V

5 结论

本文首次分析了 $\text{Si}/\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 双异质结结构 BOA 型光开关模型, 对该开关的纵向结构参数、横向结构参数进行了设计, 分析和设计了电学参数, 从理论上证明了 $\text{SiGe}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ 双异质结 BOA 型光开关的实用性和可行性.

参 考 文 献

- [1] R. A. Soref, F. Namavar and J. P. Lorenzo, *Optics Letters*, 1990, **15**(5):270.
- [2] Y. M. Liu and P. R. Prucnal, *Electronics Letters*, 1992, **28**(15):1434.
- [3] S. F. Pesarcik, G. V. Treyz, S. S. Iyer and J. M. Halbout, *Electronics Letters*, 1992, **28**(2):159.
- [4] H. Temkin, A. Antreasyan, N. A. Olsson, T. P. Pearsall and J. C. Bean, *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**(13):809.
- [5] R. A. Mayer, K. H. Jung, T. Y. Hsieh, Dim-Lee Kwong and J. C. Campbell, *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**(24):2744.
- [6] R. D. Lareau, L. Friedman and R. A. Soref, *Electronics Letters*, 1990, **26**(20):1653.
- [7] U. Fischer, B. Schuppert and K. Petermann, *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, **5**(7):785.
- [8] 冯浩, 李锡华, 王明华, 吴志武, *半导体学报*, 1993, **14**(5):286.
- [9] Liu Enke *et al.*, 'Photonics' 92: The 2nd IEEE international workshop on photonic networks, components, and applications, J. Chrostowski and J. Terry Editors, (OCRI, Ittawa, Ontario, Canada), 1992, p.3.
- [10] 刘育梁, 刘恩科, *光学学报*, 1991, **11**(8):727.
- [11] A. Splett, J. Schmidtchen, B. Schuppert, *et al.*, *Electronics Letters*, 1990, **26**(14):1035.
- [12] 虞丽生, *半导体异质结构物理*, 北京: 科学技术出版社, 1990, 84—85.
- [13] Roosevelt People, *IEEE J. Quantum. Electron.*, 1986, **22**(9):1696.
- [14] J. C. Sturm, E. J. Prinz, P. M. Garone and P. V. Schwartz, *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **54**(26):2707.
- [15] E. P. Prinz, P. M. Garone, P. V. Schwartz, X. Xiao and J. C. Sturm, *IEDM Tech. Dig.*, 1989, p. 639.
- [16] T. Manku and A. Nathan, *IEEE Trans. on Electron Devices*, 1992, **39**(9):2082.
- [17] T. Won and H. Morkoc, *IEEE Trans. on Electron Device Letters*, 1989, **10**(1):33.
- [18] R. A. Soref, J. Schmidtchen and K. Petermann, *IEEE J. Quantum. Electron.*, 1991, **27**(8):1971.
- [19] I. J. Fritz, *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**(14):1080.
- [20] 刘育梁, 刘恩科, *光学学报*, 1994, **14**(2).

Modeling Analysis and Structure Design of $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ Heterojunction Rib BOA Switch with Large Cross-Section

Zhao Cezhou, Liu Enke and Gao Yong

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

Received 10 January 1994, revised manuscript received 7 March 1994

Abstract A simple and practical modeling of the $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ heterojunction zero-gap directional coupler switch (BOA type—Bifurcation Optical Active) is carried out. The electro-optic modulating mechanism of the zero-gap directional coupler switch is investigated by plasma dispersion effect. The electrical character of the switch is analysed by the heterojunction ultra high injection principle. On the basis of the analyses and theory of the single-mode optical waveguide with large cross-section, structure parameters and electrical parameters of the $\text{Ge}_{0.1}\text{Si}_{0.9}/\text{Si}$ heterojunction BOA switch with double-mode interference mechanism are designed.

EEACC: 4130, 4140, 4150, 2530B