

文章编号: 1002-2082(2008)05-0763-04

Ge_{0.05}Si_{0.95}/Si 异质结单模共面布拉格反射 波导光栅的设计与分析

徐勤昌, 刘淑平, 郭云香

(太原科技大学, 山西 太原 030024)

摘要: GeSi/Si 异质结布拉格反射光栅是硅基光电集成领域一种重要的集成光学器件, 分析 GeSi/Si 异质结的传光特性和布拉格条件, 通过求解布拉格光栅方程, 得出耦合系数和耦合效率。利用上述原理设计出入射角为 66°, 波导层的厚度为 2 μm, 光栅长度为 4 252 μm, 槽深为 0.05 μm, 光栅周期为 0.456 μm, 滤波带宽为 0.214 nm, 耦合效率为 84.1% 的 1.3 μm Ge_{0.05}Si_{0.95}/Si 异质结单模共面布拉格反射光栅, 并用数值模拟了入射光波电场和反射光波电场的分布。

关键词: GeSi/Si 异质结; 布拉格反射波导光栅; 分/合波器; 电场分布

中图分类号: TN252

文献标志码: A

Analysis and design of Ge_{0.05}Si_{0.95}/Si heterojunction single-mode coplanar Bragg reflection waveguide grating

XU Qin-chang, LIU Shu-ping, GUO Yun-xiang

(Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: GeSi/Si heterojunction single-mode coplanar Bragg reflection grating is an important optoelectronic integrated device in silicon based optoelectronic integrated circuits (OEIC). Optical transmission properties of GeSi/Si heterojunction and Bragg conditions are analyzed. The coupling coefficient and the coupling efficiency were derived by solving the Bragg grating equation. According to the above principle, the 1.3 μm Ge_{0.05}Si_{0.95}/Si heterojunction single-mode coplanar Bragg reflection grating was designed, whose incident angle was 66°, waveguide thickness was 2 μm, coupling width was 4 252 μm, groove depth was 0.05 μm, grating period was 0.456 μm, filtering bandwidth was 0.214 nm and coupling efficiency was 84.1%. The distribution of the electric fields of the incident and the reflected guide modes was numerically simulated.

Key words: GeSi/Si heterojunction; Bragg reflection waveguide grating; multiplexer/demultiplexer; electric field distribution

引言

长期以来 Si 在光电领域的应用落后于 III-V 族材料, 由于分子束外延和化学汽相淀积技术的发展, 使得应变可控的 GeSi/Si 异质结器件得以实

现。应变的 GeSi/Si 异质结具有许多优异的性能, 它给人们带来了全新的以“能带工程”代替传统的“杂质工程”进行器件设计的机遇。此外, GeSi 合金的间接带隙对应波长在 1.3 μm~1.55 μm, 能与红

收稿日期: 2007-10-14; 修回日期: 2007-11-05

基金项目: 山西省自然科学基金资助项目(2007011047)

作者简介: 徐勤昌(1975-), 男, 山东新泰人, 硕士研究生, 主要从事光电材料与光电器件研究。E-mail: xqc5678@163.com

外光通信窗口匹配, Ge 和 Si 材料成本低廉且与硅的微电子工艺兼容,这使得 GeSi/Si 异质结在光通信和光电子集成(OEIC)上的应用极具吸引力。已经制造出的器件如: GeSi/Si 异质结光探测器^[1], 二维 GeSi 波导^[2]等。光波导布拉格反射光栅是一种高反射率的光路变换器,如果将不同周期的此种光栅或相同周期不同方位的此种光栅级联起来可以做成分/合波器,将其和光波导探测器集成在同一衬底上可以实现不同波长光波的探测,这正是人们所渴望实现的光通信接收端的单片集成光路。而 GeSi/Si 异质结正好同时具备制作波导光栅和光波导探测器的性能,随着图形曝光技术和蚀刻技术^[3-7]的发展,在 GeSi/Si 异质结上研制出光栅已成为重要的课题。因此,GeSi/Si 异质结单模共面布拉格反射光栅的设计对于其研制及其集成光路的研制有着非常重要的意义。

1 设计原理

当 $Q = K^2 L / \beta$ (K 为光栅矢量, L 为光栅在 z 轴方向的长度, β 为导波光的传输常数) 取值不同时可以将光栅分类^[8]。 $Q \gg 1$ 时的衍射称为布拉格衍射,这时在 z 方向的取值 L 较长,只有近似满足布拉格条件的有限个波间发生耦合,也仅产生特定的 q 阶衍射波^[9-10]。

1.1 布拉格条件

对于反射型布拉格光栅,入射波和衍射波在光栅的同侧。设入射波和反射波的传输矢量分别为 σ 和 ρ , 传输常数分别为 β_i 和 β_d , θ_d 为衍射角, θ_i 为入射角, φ 为 K 与 z 轴的夹角,如图1所示。在正常入射时 $\beta_i = \beta_d = \beta$ 。在 y 方向和 z 方向布拉格条件分别为

$$\beta_d \sin \theta_d = \beta_i \sin \theta_i + qK \sin \varphi \quad (1)$$

$$\beta_d \cos \theta_d = \beta_i \cos \theta_i + qK \cos \varphi \quad (2)$$

$$(q \text{ 取不为零的整数})$$

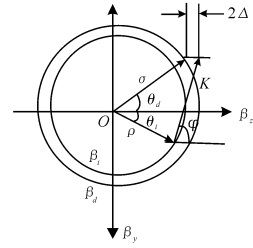


图1 布拉格衍射的传输矢量图

Fig. 1 Transmission vector diagram of Bragg diffraction
在 λ 恒定时,把满足布拉格条件的入射角和衍射角定为 θ_{iB} 和 θ_{dB} ,在稍微偏离布拉格条件的场合下 $\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_{iB}$ 。我们只分析 z 方向的偏离度,将其定义为

$$2\Delta = \beta_d \cos \theta_d - (\beta_i \cos \theta_i + qK \cos \varphi) \quad (3)$$

当 $2\theta_i$ 很小时,

$$2\Delta = -[qK\beta_i \sin(\varphi - \theta_{iB}) / \beta_d \cos \theta_{dB}] \Delta\theta_i \quad (4)$$

在 λ 变化时,波长 λ 和 λ' 产生的衍射角分别为 θ_{iB} 和 θ'_{iB} ,这时波长变化为

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda \quad (5)$$

相应的布拉格角偏移为

$$\Delta\theta_i = \theta_{iB} - \theta'_{iB} \quad (6)$$

在远离截止的模中,由(1)式、(2)式、(4)式、(5)式和(6)式得:

$$2\Delta = -[qK \cos(\theta_{dB} - \varphi) / \cos \theta_{dB}] (\Delta\lambda / \lambda) \quad (7)$$

如上所述,在布拉格大部分条件下,可以认为入射角仅与 q 阶次的特定布拉格条件相关联的衍射波相耦合。

1.2 反射型光栅的耦合效率

如果将入射波振幅和衍射波振幅分别设为 $R(z)$ 和 $S(z)$,由模耦合方程和光栅内部的介电常数 $\Delta\epsilon$ 的傅里叶展开式 $\Delta\epsilon(x, y, z) = \sum_q \Delta\epsilon_q \exp(-jqK \cdot r)$ 可以得到消去自耦合的布拉格光栅方程。反射型光栅的情况下,在 $R(0) = 1$ 和 $S(0) = 0$ 的边界条件下,求解布拉格反射型光栅方程可以得到衍射效率:

$$\eta = \frac{|C_S|}{C_R} \left| \frac{S(L)}{R(0)} \right|^2 = \frac{|k|^2 / C_R |C_S|}{(|k|^2 / C_R |C_S| - \Delta^2) \coth^2(\sqrt{|k|^2 / C_R |C_S| - \Delta^2} L) + \Delta^2} = \frac{1}{[1 + (1 - \xi^2 / v^2) \sinh^2(v^2 - \xi^2)^{1/2}]^{-1}} \quad (8)$$

$$v = |k|L / \sqrt{C_R / |C_S|}, C_R = \cos \theta_i > 0, C_S =$$

$$\sin \theta_d < 0, \xi = \Delta L$$

$$\text{当 } \xi = 0 \text{ 时,}$$

$$\eta_0 = \tanh^2 v \quad (9)$$

η_0 相对于 v 单调增加,当 $v = \frac{\pi}{2}$ 时, $\eta_0 = 84.1\%$ 。

1.3 角度的选择性和波长的选择性

在 $v = \frac{\pi}{2}$ 时, 当 $\xi = \Delta L \approx 2.5$ 时, $\eta/\eta_0 = 0.5$ 。

结合(4)式和(7)式进行评价, 在 $\varphi = 0$ 时, 可得角度的选择性和波长的选择性分别为

$$2\Delta\theta_i \approx 2 \cdot (2/|q|KL\tan\theta_{dB}) \cdot 2.5 \approx 2\Lambda/|q|L\tan\theta_{dB} \quad (10)$$

$$2\Delta\lambda/\lambda \approx 2 \cdot (2/|q|KL) \cdot 2.5 \approx 2\Lambda/|q|L \quad (11)$$

式中 Λ 为光栅周期。

1.4 耦合系数

共面耦合的耦合系数由模耦合方程中耦合系

数 k 的表达式和光栅内部的介电常数 $\Delta\epsilon$ 的傅里叶展开式 $\Delta\epsilon(x, y, z) = \sum_q \Delta\epsilon_q(x) \exp(-jqk \cdot r)$ 求得, 在此我们只考虑 TE-TE₀ 耦合。在 $2h \ll T$ 的情况下积分中场的振幅可以近似取 $x = 0$ 的值^[12], 对于矩形起伏型光栅介电常数的变化为

$$\Delta\epsilon_q(x) = \Delta\epsilon_q = (n_f^2 - n_c^2) [\sin(qa\pi)q\pi] \quad (q \neq 0, 0 < a < 1, -1 < a < 1) \quad (12)$$

考虑到耦合系数对 θ_d 和 θ_i 的依存性, 在 TE-TE₀ 耦合时可得:

$$k_{\text{TE}_n \text{TE}_m} \approx \frac{\epsilon_0 \omega}{4} E_y^{(n)*}(0) E_y^{(m)}(0) 2h \Delta\epsilon_q \cos(\theta_d - \theta_i) = \frac{4\pi \sin(qa\pi)}{\lambda} \frac{h}{q\pi} \frac{1}{[T_{\text{eff}n} T_{\text{eff}m}]^{\frac{1}{2}}} \frac{\sqrt{(n_f^2 - N_n^2)(n_f^2 - N_m^2)}}{\sqrt{N_n N_m}} \cos(\theta_d - \theta_i) \quad (13)$$

式中: h 为光栅齿高; a 为齿宽与整个周期 Λ 的比例; T_{eff} 为波导层的有效厚度; n_f 为波导折射率; N 为波导层的有效折射率。

2 光栅设计

波导光栅从结构上分为折射率调制型光栅和起伏型光栅, 其中矩形起伏型光栅是一种重要的光栅, 考虑到制作工艺和耦合效率, 本文采用矩形起伏型光栅, 光栅截面如图 2 所示。以下是应用导模和导模耦合理论, 对矩形起伏型的 $1.3 \mu\text{m}$ $\text{Ge}_{0.05}\text{Si}_{0.95}/\text{Si}$ 异质结单模共面布拉格反射光栅的尺寸进行设计。

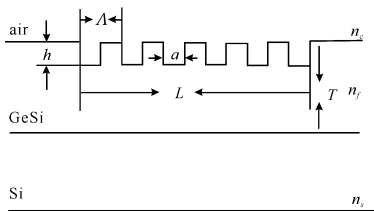


图 2 矩形截面布拉格反射波导光栅

Fig. 2 Bragg reflection waveguide grating with rectangular section

2.1 光栅波导层的厚度

由 D. V. Lang 等人的研究结果^[11]可以得到 $\text{Ge}_{0.05}\text{Si}_{0.95}$ 应变合金的折射率为 $n_f = 3.509$, 而且它对 $1.3 \mu\text{m}$ 波长的光波几乎不吸收——是透明的。已知空气的折射率 $n_c = 1.0$, Si 的折射率 $n_s = 3.5$, 只考虑 TE₀ 导模, 由平面波导 TE 导模的本征方程

通过叠代法进行数值求解, 可以得到平面波导层的厚度 $T = 2 \mu\text{m}$, 单模传输的有效折射率 $N_0 = 3.5025$, 所用入射光波的波长为 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ 。

2.2 光栅长度和槽深

对矩形截面光栅, 由(13)式可知, 当 $|q| = 1$ 且 $a = \frac{1}{2}$ 时, 耦合系数 $|k|$ 可取最大值, 由(8)式和(9)式可得 $\eta_0 = 84.1\%$ 时, $L = \frac{\pi}{2|k|}$ 。将(8)式和 $m = n = 0$ 时的(13)式代入上式得:

$$L = -\frac{1}{\cos(2\theta_i)} \cdot \frac{\lambda T_{\text{eff}0} N_0 \pi}{8h(n_f^2 - N_0^2)} \quad (14)$$

光栅在垂直于 z 方向的宽度 W 由导模的光束宽度 $2Y$ 和入射角 θ_i 决定, 即

$$W = \frac{2Y}{\cos \theta_i} \quad (15)$$

因此光栅所占的平面面积为

$$S = LW = -\frac{1}{\cos(2\theta_i) \cos \theta_i} \frac{Y \lambda T_{\text{eff}0} N_0 \pi}{4h(n_f^2 - N_0^2)} \quad (16)$$

等式两边对 θ_i 求导数, 并使求导后的式子为 0, 可得当 $\theta_i = \arccos \frac{1}{\sqrt{6}} \approx 66^\circ$ 时 S 取最小值, 即光栅的尺寸最小。由上文 $2h \ll T$ 可知, $h \gg 1 \mu\text{m}$ 时可以选择 $h = 0.05 \mu\text{m}$, 将 $\theta_i = 66^\circ$ 和 $h = 0.05 \mu\text{m}$ 代入(14)式可得光栅在 z 轴方向的长度(耦合长度) $L \approx 4252 \mu\text{m}$ 。

2.3 光栅的周期和槽宽

取 $\varphi = 0$, 由(1)式和(2)式可得光栅周期为

$$\Lambda = -\frac{q\lambda}{2N \cos \theta_i} \quad (17)$$

入射角和衍射角之和为

$$\theta_i + \theta_d = \pi$$

将 $q = -1$ 和 $\theta_i = 66^\circ$ 代入 (17) 式得 $\Lambda \approx 0.456 \mu\text{m}$ 。由前面的分析可知 $a = 1/2$ 即表示槽宽是周期的 $1/2$, 因此槽宽 $a = 0.228 \mu\text{m}$, 将 $\Lambda \approx 0.456 \mu\text{m}$ 代入 (10) 式得波长的选择性为 $2\Delta\lambda/\lambda = 0.214 \text{ nm}$ 。

3 数值模拟

光栅的入射光波和反射光波都是 0 阶 TE 导模, 其电场 $E(y)$ 分布用 MATLAB 软件模拟, 结果如图 3 所示。由图 3 可以直观看到, 入射波电场和反射波电场非常接近, 此光栅有较高耦合效率可达到 84.1%, 图中虚线表示入射光波电场, 实线表示反射光波电场。

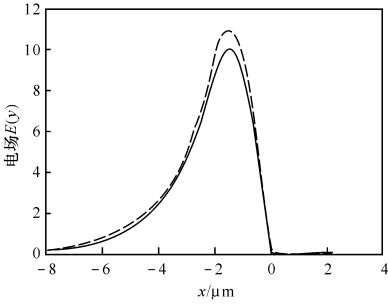


图 3 入射光波和反射光波电场模拟图

Fig. 3 Electric field simulation of incident and reflected guide modes

4 结论

本文所设计的 $1.3 \mu\text{m} \text{ Ge}_{0.05}\text{Si}_{0.95}/\text{Si}$ 异质结单模共面布拉格反射光栅入射角为 66° , 波导层厚度为 $2 \mu\text{m}$, 光栅长度为 $4\ 252 \mu\text{m}$, 槽深为 $0.05 \mu\text{m}$, 光栅周期为 $0.456 \mu\text{m}$, 滤波带宽为 0.214 nm , 并对输入光场和输出光场进行了数值模拟, 其耦合效率可达到 84.1%。在同一波导上还可以设计出其他波长的光栅, 本文不再赘述, 将它们级联起来就可以构成波长分/合波器。

参考文献:

[1] LURYI S, KASTALSKY A, BEAN J C. New infrared detector on silicon chip [J]. IEEE Trans Electron Devices, 1984, ED-31:1135.

[2] POGOSSIANA S P, VESCAN L, VONSOVICI A. High-confinement SiGe low-loss waveguides for Si-based optoelectronics [J]. Appl. Phys. Lett., 1999, 75(10):1440-1442.

[3] 刘青, 陈均均, 郭丽丽. 超短激光脉冲对宽带光学物质的微加工 [J]. 应用光学, 2006, 27(5):428-431.

LIU Qing, CHEN Jun-jun, GUO Li-li. Micro-machining of wide-band optical materials with ultrashort laser pulses [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(5):426-431. (in Chinese)

[4] OHMURA Y. Current status of high-index immersion lithography development [J]. SPIE, 2007, 6520:652006.

[5] KECK J, OLIVER J B, KESSLER T J, et al. Manufacture and development of multilayer diffraction gratings [J]. SPIE, 2005, 5991:443-448.

[6] 徐向东, 洪义麟, 付绍军, 等. 全息离子束刻蚀衍射光栅 [J]. 物理, 2004, 33(5):340-344.

XU Xiang-dong, HONG Yi-lin, FU Shao-jun, et al. Holographic ion beam etched diffraction gratings [J]. Physics, 2004, 33(5):340-344. (in Chinese)

[7] LIU Ying, LOU Jun, XIAO Kai, et al. Studies on phase Ronchi gratings and the fabrication of soft X-ray condenser zone plates [J]. SPIE, 2005, 5636:150-158.

[8] KLEIN W R, COOK B D. Unified approach to ultrasonic light diffraction [J]. IEEE Tran. Sonics Ultrasonics, 1967, SU-14(3):123.

[9] KENAN R P. Theory of diffraction of guided optical waves by thick holograms [J]. J. Appl. Phys., 1975, 46(10):4545-4551.

[10] STOLL H M. Distributed Bragg deflector: a multifunctional integrated optical device [J]. Appl. Opt., 1978, 17(16):2562-2569.

[11] 赵策洲, 高勇. 半导体硅基材料及其光波导 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1997.

ZHAO Ce-zhou, GAO Yong. Semiconductor silicon-based materials and its optical waveguide [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1997. (in Chinese)