

# 蝶形电极结构载流子注入全内反射 交叉脊形光波导开关\*

李宝军 刘恩科

(西安交通大学微电子工程系 西安 710049)

**摘要** 分析了一种蝶形电极结构交叉脊形光波导开关。这种结构可使波导交叉角增大,反射损耗降低,传输端的消光比提高,波导的数值孔径变大,且有较小的串音。

PACC: 4280L, 4280S

## 1 引言

硅是微电子学和光电子学领域最重要的半导体材料。硅单晶对于  $1.3 \sim 1.6\mu\text{m}$  光纤通信“光学窗口”的光波是透明的,且其折射率可通过载流子浓度来调节<sup>[1]</sup>。因而吸引着越来越多的科学家和工程技术人员对硅基光电子器件的研究。硅基光波导开关是硅基光电子集成中的重要器件。通过对交叉光波导开关的研制发现,交叉角  $\theta$  越大,光波导在分支处的损耗越大<sup>[2,3]</sup>。交叉角  $\theta$  很小,则器件很长,不仅给制备带来了困难,而且会导致开关功率和串音增大,使开关难以集成。因此,在制作交叉光波导开关时,交叉角  $\theta$  是个受临界角  $\theta_c$  限定的结构参数<sup>[4]</sup>。为了不因器件很长而给制备带来困难,又能使光开关交叉角加大,则是一个有待探讨的问题。

基于上述情况,本文提出并分析了一种蝶形电极结构载流子注入全内反射交叉脊形光波导开关。

## 2 理论基础

图 1 是硅全内反射脊形交叉光波导开关结构示意图。图中  $n$  是开关区(反射区)S 的折射率,  $n_1$  是光波导的折射率。当光开关处于开态时,没有载流子的注入,反射区 S 的折射率与波导的折射率相等,即  $n=n_1$ 。从 1 端入射的光束将透过反射区 S 传输到 4 端。

\* 国家自然科学基金资助项目

李宝军 男,1964 年生,博士生,现从事半导体集成光学研究(原工作单位为甘肃省教育学院物理系)

刘恩科 男,1930 年生,教授,博士生导师,主要从事微电子技术和集成光学研究

1996 年 4 月 1 日收到初稿,1996 年 5 月 22 日收到修改稿

当  $P^+$ - $N$  结加正向偏压  $V$  时, 将有载流子注入到波导中, 如图 1(b) 所示。注入的载流子引起反射区的折射率变化描述如下<sup>[5]</sup>:

$$\Delta n = \pm \frac{q^2 \lambda^2}{8\pi^2 c^2 \epsilon_0 n} \left( \frac{\Delta N_e}{m_{ee}^*} + \frac{\Delta N_h}{m_{ch}^*} \right) \quad (1)$$

其中  $q$  是电子电荷;  $\lambda$  是光波长;  $c$  是真空中光速,  $\epsilon_0$  是真空介电常数;  $n$  为纯硅的折射率;  $\Delta N_e$  和  $\Delta N_h$  分别为电子和空穴相对于本征硅时的浓度变化;  $m_{ee}^*$  和  $m_{ch}^*$  分别是电子和空穴的电导有效质量。由于电子-空穴对浓度的变化会引起材料的折射率变化。因此, 对  $n$  型硅在波长  $\lambda=1.3\mu m$ 、本征硅的折射率  $n=3.505$  时由(1)式得:

$$\Delta n = \pm 1.8 \times 10^{21} \Delta N \quad (2)$$

式中  $\Delta N$  是电子-空穴对的浓度变化, 单位为  $cm^{-3}$ 。材料中自由载流子浓度增大时其折射率将减小。当  $\Delta N$  变化达  $10^{18} cm^{-3}$  时, 由载流子注入引起的折射率变化  $\Delta n$  接近 0.002。因而使得反射区 S 的折射率  $n < n_1$ , 从 1 端入射的光束在反射区表面全反射到 3 端, 从而实现光开关的状态。

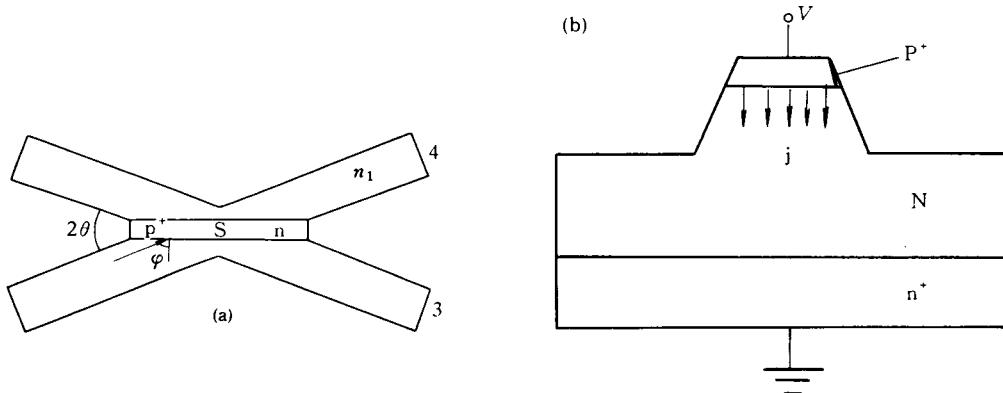


图 1 硅全内反射脊形交叉光波导开关结构  
(a) 顶视图; (b) 截面图

### 3 模型分析

在图 1 所示的光开关处于关态时, 以入射角  $\varphi$  入射的光束在反射区 S 表面被反射, 根据全反射条件,  $\varphi$  必须满足

$$\varphi \geq \varphi_c = \sin^{-1}(n/n_1) \quad (3)$$

式中  $\varphi_c$  是光束在反射区表面发生全反射时的临界角。由于  $\theta + \varphi = \pi/2$ , 由(3)式可得:

$$\theta \leq \pi/2 - \varphi_c \quad (4)$$

则脊形交叉光波导开关的最大半交叉临界角  $\theta_c$  为:

$$\theta_c = \pi/2 - \varphi_c = \pi/2 - \sin^{-1}(n/n_1) \quad (5)$$

当有载流子注入时引起反射区的折射率减小  $\Delta n$ , 所以(5)式可写为

$$\theta_c = \pi/2 - \sin^{-1}(1 - \Delta n/n_1) \quad (6)$$

波导的数值孔径

$$A_N = n_1 \sin(\pi/2 - \theta - \varphi_c) = n_1 \cos(\theta + \varphi_c) \quad (7)$$

对应  $\theta_c$  的最小临界数值孔径为:

$$A_N = n_1 \cos(\theta_c + \varphi_c) \quad (8)$$

考察(6)和(8)式知, 较大的  $\Delta n$  有利于  $\theta_c$  的增大, 但却减小了数值孔径  $A_N$  的值.

为了扩大交叉角, 采用图 2 所示角度为  $\theta_w$  的蝶形电极代替图 1 所示的条形反射区. 从波导 1 端入射的光束 1 和 2 分别以入射角  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  入射到蝶形反射区 I 端. 由于  $\varphi_2 > \varphi_1$ , 光束 2 被全反射到 II 端, 又经 II 端全反射. 因而只讨论光束 1 的情形.

当光开关处于关态时, 根据全反射条件有:

$$\varphi_1 \geq \varphi_{lc} = \sin^{-1}(n/n_1) \quad (9)$$

由图中几何关系可导出

$$\begin{cases} \varphi_1 + \theta' = \pi/2 \\ \varphi_1 + \theta - \theta_w/2 = \pi/2 \end{cases} \quad (10)$$

因而得

$$\theta \leq \pi/2 + \theta_w/2 - \varphi_{lc} \quad (11)$$

则蝶形电极交叉光波导开关的最大交叉临界角为:

$$\theta_{lc}' = \pi/2 + \theta_w/2 - \sin^{-1}(1 - \Delta n/n_1) \quad (12)$$

比较(6)和(12)两式看出, 在相同的  $\Delta n$  下, 采用蝶形电极结构后光波导开关的最大交叉角增大了  $\theta_w/2$ . 其数值孔径为:

$$A_N' = n_1 \sin(\pi/2 - \theta' - \varphi_{lc}) = n_1 \cos(\theta' + \varphi_{lc}) = n_1 \cos(\theta + \varphi_{lc} - \theta_w/2) \quad (13)$$

为了最大限度地减小模式转换和损耗, 硅基交叉波导光开关的夹角  $\theta = 3 \sim 4^\circ$ <sup>[6]</sup>. 图 1(a)中条形电极和图 2 中蝶形电极都是折射率为  $n$  的载流子注入反射区, 光在其表面发生全反射时的临界角相等, 即  $\varphi_c = \varphi_{lc}$ . 比较(13)和(7)两式知, 采用蝶形电极结构后, (13)式中余弦函数的角度值相对(7)式减小了  $\theta_w/2$ , 因而数值孔径  $A_N'$  相对于  $A_N$  增大了, 有利于与单模光纤的数值孔径匹配.

## 4 开关特性

由于交叉波导折射率变化的区域长度远大于波长  $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ , 因此可将反射区视为无限长<sup>[7]</sup>. 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, 可得透射率  $P$  和反射率  $R$  与交叉角  $\theta$  的关系分别为:

$$P = \frac{2 \sin(\theta/2)}{\sin(\theta/2) + \sqrt{(1 + \Delta n/n_1)^2 - \cos^2(\theta/2)}} \quad (14)$$

$$R = \frac{\sin(\theta/2) - \sqrt{(1 + \Delta n/n_1)^2 - \cos^2(\theta/2)}}{\sin(\theta/2) + \sqrt{(1 + \Delta n/n_1)^2 - \cos^2(\theta/2)}} \quad (15)$$

消光比  $E$  和串音  $C$  分别为:

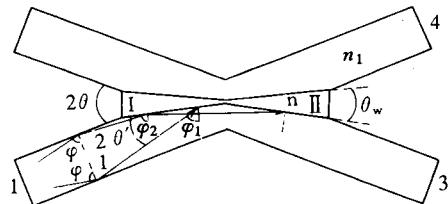


图 2 蝶形电极交叉光波导开关

$$E = 10 \log P$$

$$C = 10 \log (R/P)$$

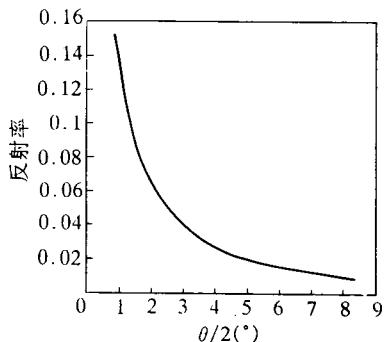
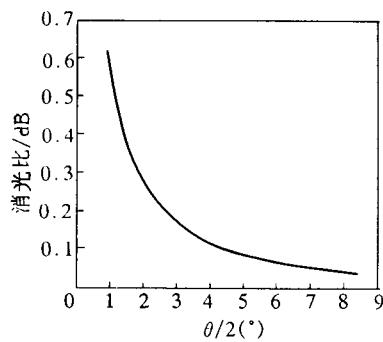
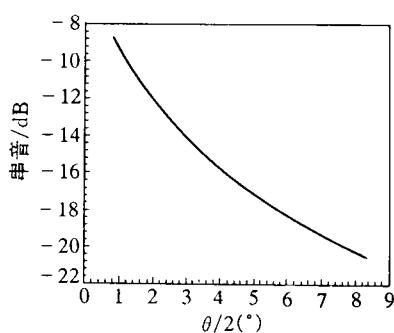
图3 反射率  $R$  与交叉角  $\theta$  的关系图4 传输端消光比  $E$  与交叉角  $\theta$  的关系

图3、图4和图5分别是  $\Delta n = -0.002$ ,  $n_1 = 3.5$  时的反射率  $R$ 、传输端消光比  $E$  和串音  $C$  与交叉角  $\theta$  的关系。从图可知, 随角度  $\theta/2$  的减小, 反射率增大。采用图2所示的蝶形电极结构之后, 要用  $\theta' = \theta - \theta_w/2$  代替(14)和(15)两式中的  $\theta$ , 从而使得反射率增大了。同时降低了反射损耗, 提高了传输端的消光比, 且对串音不会造成明显的影响。

## 5 结论

本文分析了具有蝶形电极结构的载流子注入全内反射交叉脊形光波导开关。并同条形电极结构进行比较发现, 采用蝶形电极结构不但可使光开关的交叉角加大, 而且有利于反射损耗的降低和消光比的提高, 且对串音不会造成明显的影响。同时使光波导的数值孔径增大, 做到在光纤通信交换系统中易于单模光纤的数值孔径匹配。

图5 串音  $C$  与交叉角  $\theta$  的关系

## 参 考 文 献

- [1] R. A. Soref and J. P. Lorenzo, IEEE J. Quantum Electron., 1986, 26(6): 873~879.
- [2] Z. Weissman, E. Marom and A. Hardy, Opt. Lett., 1989, 14(5): 293~295.
- [3] 林斐华, 庄婉如, 王德煌, 半导体学报, 1993, 14(4): 233~241.
- [4] 康寿万, 董玉和, 庄婉如, 半导体学报, 1995, 16(12): 937~941.
- [5] R. A. Soref and B. R. Bennett, IEEE J. Quantum Electron., 1987, 23(1): 123~129.
- [6] 刘育梁, 刘恩科, 刘志敏, 等, 光学学报, 1994, 14(3): 292~295.
- [7] K. Shimomura, Y. Suematsu and S. Arai, IEEE J. Quantum Electron., 1990, 26(5): 883~892.

## Intersectional Rib Optical Waveguide Switch With Bow-tie Electrode on Carriers Injection Total Internal Reflection

Li Baojun and Liu Enke

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

Received 1 April 1996, revised manuscript received 22 May 1996

**Abstract** Reflection type optical switches with intersecting rib waveguide and bow-tie electrode are investigated. The results show that the intersecting waveguide structures with the bow-tie electrodes are helpful in realization of wide-deflection angle, low reflecting loss, large extinction ratio, large numerical aperture, and without remarkable adverse effects upon the crosstalk.

**PACC:** 4280L, 4280S