

载流子注入全内反射型 GaAs/GaAlAs 光波导开关

庄婉如 林雯华 杨培生 李任 石志文
赵一兵 孙富荣 高俊华 刘涛

中国科学院半导体研究所, 集成光电子学国家重点联合实验室, 北京 100083
(1991年11月4日收到, 1992年2月11日收到修改稿)

研制出利用载流子注入能带填充效应制成的全内反射型 (CI-TIR) GaAs/GaAlAs 光波导开关. 开关工作波长为 $0.87\mu\text{m}$, 工作电流 70mA , 消光比 14dB , 串话 -13dB . 该开关具有尺寸小, 与偏振无关, 无阻塞, 易集成的优点.

PACC: 4280L, 4282, 4280, 7280E

一、引言

光波导开关阵列是光纤通信交换系统和光信息处理系统中的重要部件, 尤其是宽带光交换网络技术中的关键部件. 以往主要使用 LiNbO_3 的光波导开关, 近年来, 由于光电集成和光子集成的需要, III-V 族化合物半导体光波导开关发展很快, 在实现系统的小型化, 集成化和实用化方面起着重要的作用. 半导体光波导开关可分为定向耦合型 (DC)^[1-2] 和全内反射型 (TIR)^[3]. TIR 型开关器件尺寸小, 工艺难度较小, 易于与半导体有源器件集成在同一芯片上, 易于制成大规模 $N \times N$ 开关阵列.

TIR 开关要求有较大的折射率变化, 而利用载流子注入能带填充效应可以引起较大的折射率变化 Δn , 当注入载流子密度大于 10^{18}cm^{-3} 时, Δn 可以达到 1×10^{-2} , 比光电效应引起的折射率变化大两个数量级, 而且与人射光的偏振态无关^[4], 这些特征正好可满足 TIR 开关的要求. 因此, 利用载流子注入能带填充效应制作的全内反射型开关是近年来国际上半导体光波导开关的一个新的发展方向^[4-5].

本文首次报道了 GaAs/GaAlAs 双异质结构 CI-TIR 开关的设计、制造及实验测量结果.

二、CI-TIR 开关原理及器件设计

GaAs/GaAlAs CI-TIR 光波导开关的原理图表示于图 1(a) 及 (b), 两个单模光波导交叉成 θ 角, 中央交叉区扩 Zn 制成 PIN 结构, 当器件加上正向偏置注入电子和空穴

时, 由于能带填充效应引起载流子注入区中折射率显著下降。若入射光以大于临界角入射到折射率下降界面上时发生全内反射, 从而改变了光路, 光波由反射端输出, 实现了光开关的作用。

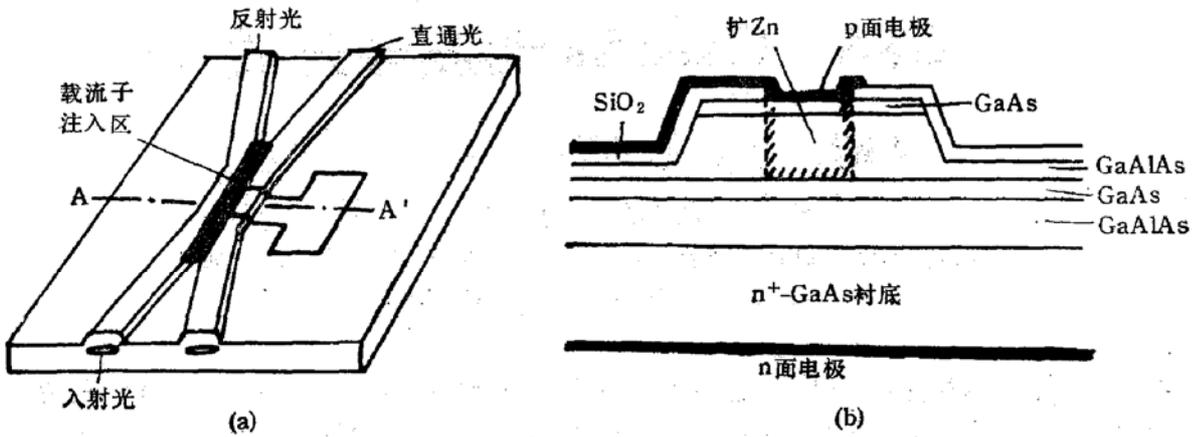


图1 GaAs/GaAlAs 载流子注入全内反射型光波导开关
(a) 结构示意图 (b) AA' 的纵向结构示意图

当载流子注入到达一定水平时, 电子的准费米能级 E_{FN} 进入导带几个 kT , 空穴的准费米能级 E_{FP} 也进入价带几个 kT , 此时便引起了能带填充效应。其结果使吸收边移向高能端(即蓝移)。由 Kramers-Kronig 关系, 能带填充效应引起的折射率变化 Δn 为^[6]

$$\Delta n(\Delta N, \Delta P, E) = \frac{c\hbar}{e^2} P \int_0^{\infty} \frac{\Delta \alpha(\Delta N, \Delta P, E')}{E'^2 - E^2} dE', \quad (1)$$

式中 ΔN 为注入电子数; ΔP 为注入空穴数; $\Delta \alpha$ 为吸收系数的变化值; E 为入射光子能量 P 代表主值积分。图 2 给出由 (1) 式计算出的 GaAs 内注入不同载流子浓度下的折射率变化 Δn 的色散曲线。由图可以看出: Δn 在 GaAs 带隙处下降最多。考虑到带隙离吸收边很近, 其吸收损耗太大, 为此, 要把波导层材料往高能端移动 50—100meV。

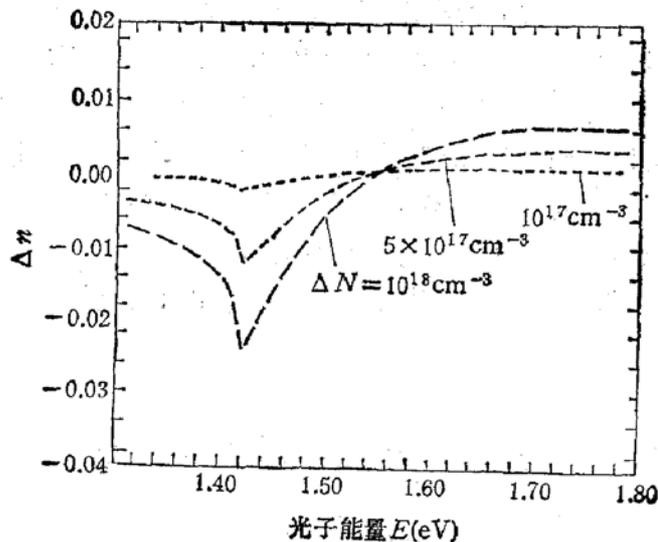


图2 GaAs 中能带填充效应引起的折射率变化的色散曲线

CI-TIR 开关采用双异质结构, 将注入的电子和空穴限制在波导层中, 有利于提高注入载流子浓度。能带填充效应引起的折射率变化 Δn 与注入载流子浓度 ΔN 呈线性关系。对 GaAs 单晶材料, 数值计算结果表明^[7],

$$\begin{aligned}\Delta n &= -2.2 \times 10^{-20} \Delta N & (E = 1.40\text{eV}) \\ &= -1.7 \times 10^{-20} \Delta N & (E = 1.37\text{eV}) \\ &= -1.5 \times 10^{-20} \Delta N & (E = 1.36\text{eV}) \\ &= -1.0 \times 10^{-20} \Delta N & (E = 1.32\text{eV})\end{aligned}\quad (2)$$

在 ΔN 为 $10^{16} \sim 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 范围内, 实测结果与上式计算结果符合得很好, 但当 ΔN 达到 10^{19}cm^{-3} 以上时, $\Delta n \sim \Delta N$ 变成准线性关系, 此时还有一些其它效应起作用。当注入载流子浓度为 10^{18}cm^{-3} 时, 折射率变化可达 10^{-2} 量级。注入载流子浓度由下式给出:

$$\Delta N = \frac{J\tau}{qd}, \quad (3)$$

式中 J 为注入电流密度, τ 为注入载流子寿命, d 为波导层厚度。

全内反射发生时, 临界角 θ_c 为:

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(1 + \frac{\Delta n}{n_w} \right) \quad (4)$$

式中 n_w 为波导层的折射率。

作者已在文献 [8] 中对 2×2 CI-TIR 开关进行器件模型分析, 得到开关的消光比、串话及反射损耗等性能与开关结构参数之间的关系曲线、不同注入载流子水平引起的折射率变化对开关性能的影响以及波导吸收系数对开关性能的影响等。利用这些关系曲线可以对 CI-TIR 开关进行优化设计。

CI-TIR 开关纵向结构示意图见图 1(b)。总宽 $4 \mu\text{m}$ 的 GaAs/GaAlAs 双异质结构条形加载波导交叉成 θ 角, 虽然 θ 角愈小, 反射率愈接近于 1, 但 $\theta/2 < 1^\circ$ 时, 导波模式会发生相互作用, 使串话增大, 所以我们选择 θ 角为 4° , 中央交叉区长 $90 \mu\text{m}$, 宽 $4 \mu\text{m}$, 端口弯曲波导半径为 2mm , 端口波导间距为 $50 \mu\text{m}$ 。

采用液相外延在 n^+ -GaAs 衬底上依次生长 n^+ -GaAs 缓冲层, N-Ga_{0.7}Al_{0.3}As 下限制层, 不掺杂 Ga_{0.94}Al_{0.06}As 波导层、不掺杂 Ga_{0.7}Al_{0.3}As 上限制层以及顶层 GaAs 层。波导层带隙波长 $0.82 \mu\text{m}$, 本底浓度 $< 1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 厚度 $0.5 \mu\text{m}$ 。采用反应离子刻蚀 (RIE) 技术制作台高约为 $1.0 \mu\text{m}$ 加载波导; 用扩 Zn 技术在中央交叉区形成 p-i-n 结构, 再采用剥离工艺制作 P 电极 Cr/Au 图形; n 电极采用 Au/Ge/Ni 合金。解理制成管芯, 器件长 1mm , 宽 $340 \mu\text{m}$ 。图 3(a) 为烧结在热沉上的 CI-TIR 管芯照片, 图 3(b) 为管芯端口照片 (见图版 1)。

三、性能测量与讨论

CI-TIR 开关测试采用带单模尾纤的 $0.87 \mu\text{m}$ GaAs/GaAlAs 激光器作光源, 用红外摄像机观察其输出端的近场图, 用选行器扫描, 在示波器上记录下输出光斑模场分布。

定义 CI-TIR 开关的 n 项静态性能如下:

$$\text{直通端消光比} \quad E_t \equiv 10 \log \frac{I_t(0)}{I_t(I)}$$

$$\text{反射端消光比} \quad E_r \equiv 10 \log \frac{I_r(I)}{I_r(0)}$$

式中 $I_t(0)$ 及 $I_t(I)$ 分别表示 $\Delta n = 0$ (无注入电流) 和 $\Delta n < 0$ (有注入电流) 直通端的输出光强; $I_r(I)$ 及 $I_r(0)$ 分别表示 $\Delta n < 0$ 及 $\Delta n = 0$ 时反射端的输出光强.

$$\text{关态串话(无注入电流)} \quad CT(0) \equiv 10 \log \frac{I_r(0)}{I_t(0)}$$

$$\text{开态串话(有注入电流)} \quad CT(I) \equiv 10 \log \frac{I_r(I)}{I_t(I)}$$

$$\text{开关总插入损耗} \quad L_t \equiv 10 \log \frac{I_i}{I_t(0)}$$

式中 I_i 为从输入端输入的光强

在人射光波长为 $0.87 \mu\text{m}$ 处, 随着注入电流的增加, 直通端的输出光 I_t 逐渐减弱, 反射端的输出光 I_r 逐渐加强, 对 $25^\#$ 开关器件, 在注入电流为 60mA 时 (相当于电流密度 6.6kA/cm^2), 光线大部分由反射端输出, 实现了输出光的开关转换. 其输出光斑近场照片和行扫描记录的光场分布表示于图 4 (见图版 II).

图 5 为 $19^\#$ 开关器件归一化 I_t 及 I_r 随注入电流的变化, 随注入电流增加, I_t 逐渐下

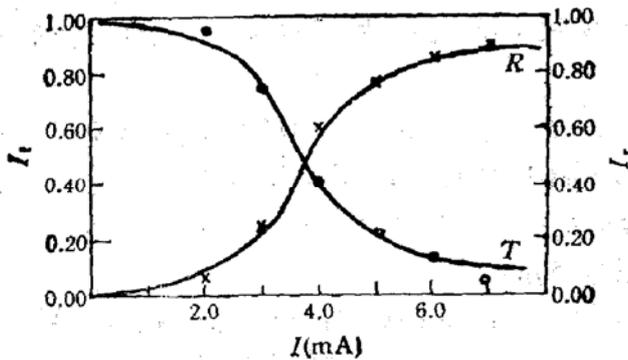


图 5 $19^\#$ CI-TIR 开关 I_t 及 I_r 随注入电流的变化

降, I_r 逐渐增加; 而总的光输出功率 ($I_t + I_r$) 随注入电流下降不多, 说明 CI-TIR 开关由关态到开态的转换没有产生很大的损耗. 从测量可以得知在注入电流 70mA 时, 直通端消光比 E_t 为 14dB ; 反射端消光比 E_r 为 19dB ; 开态串话为 -13dB ; 关态串话 -20dB .

选用 CI-TIR 开关的一条直通波导进行损耗测量, 测得总插入损耗为 14.3dB ; 这里包含光纤与开关的耦合损

耗为 $4-5 \text{dB}$, 包括两个端口的 3dB 反射损耗, 也包括弯曲损耗与散射损耗分别约为 $1-2 \text{dB}$, 从这些数据可估算出波导传输损耗大约为 1dB/mm .

由于 CI-TIR 开关的主要功能是用于光交换网络中开关转换, 目前的要求还不是在高速系统中使用, 因而对高速调制等动态特性尚未进行测量. 从静态测量结果代入公式 (1)~(4), 可以得知, 载流子浓度要高于 10^{18}cm^{-3} (即 Δn 要达到 10^{-2} 量级), 才能得到开关反转; 从工艺上如何保证获得光滑的折射率变化区边界是获得优良器件的关键; 另外, 波导层本底杂质浓度还需再进一步降低, 才能进一步改善器件的各种性能. 下一步可望采用 MOCVD 技术外延生长双异质结构, 以使波导层本底杂质浓度降低至 10^{15}cm^{-3} , 这样开关电流及损耗将进一步改善.

四、小 结

本文研制了一种结构新颖的全内反射型 (TIR) GaAs/GaAlAs 双异质结构光波导开关。该开关利用载流子注入引起的能带填充效应所产生的较大折射率变化, 实现开关转换作用。实验测量结果与理论分析结论相吻合。由于载流子注入的各向同性, CI-TIR 开关与偏振态无关; 开关电极对称地放置在交叉区中央, 可做为无阻塞的 2×2 开关单元。用这种开关单元可组成可供光交换系统使用的开关阵列。此种开关阵列尺寸小, 结构由双异质结构组成, 与半导体有源器件结构很类似, 与 OEIC 和 PIC 工艺兼容性好, 容易实现与光电器件的单片集成。

致谢: 作者衷心感谢朱龙德、金才政提供关键的测试设备, 使测试工作得以顺利进行。

参 考 文 献

- [1] J. C. Cambeil, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **27**, 202(1975).
- [2] A. Carenco, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **40**, 15(1982)
- [3] C. S. Tsai, *et al.*, *IEEE J. Quantum Electronics*, **QE 14**, 513(1978).
- [4] H. Inoue, *et al.*, *IEEE J. Selected Areas in Communication*, **6**, 1262(1988).
- [5] M. Renaud, *et al.*, 217, ECOC'90.
- [6] B. R. Bennett, *et al.*, *IEEE J. Quantum Electronics*, **26**(1) 113(1990).
- [7] 林受华、王德煌、庄婉如, «'91光电子器件与集成技术年会论文集»1991.
- [8] 林受华、庄婉如、王德煌, 半导体学报, 1993, (待发表).
- [9] S. H. Lin, *et al.*, *Electronics Lett.*, **21**, 597(1985).

Carrier-Injected GaAs/GaAlAs Total Internal Reflection Optical Switch

Zhuang Wanru, Lin Wenhua, Yang Peisheng, Li Ren, Shi Zhiwen,
Zhao Yibing, Sun Furong Gao Junhua and Liu Tao

Institute of Semiconductors, Academia Sinica, National Integrated Optoelectronics Lab. Beijing 100083

(Received 4 November 1991; revised manuscript received 11 February 1992)

Abstract

GaAs/GaAlAs total internal reflection optical switches on the base of carrier-injected (CI) band-filling effect (TIR) have been fabricated. When the switching current is 70 mA, the extinction ratio is 14 dB and cross talk is -13 dB. There are some advantages in CI-TIR, such as small size, independence of polarization, nonblock, ease of monolithic integration.

PACC: 4280L, 4282, 4280 7280E