

光交换中的半导体增益光开关门的研究*

张志坚 张朝阳 郭奕理 周炳琨

(清华大学电子工程系 北京 100084)

张权生 吴荣汉

(中国科学院半导体研究所 北京 100083)

摘要 本文通过实验对双区共腔半导体增益光开关门的动态和静态光学特性(包括温度特性、偏振特性、光谱特性、偏置特性、开关特性及增益放大特性等)进行了分析研究,特别研究了其做为增益光开关门在光子交换系统中实现数据包交换功能的可行性,对半导体光开关门的数据包开关传输能力进行了原理性实验.文章最后提出了一种采用半导体增益光开关门构成的新颖的光子交换系统网络结构.

PACC: 4255P, 4256P, 6860, 7155

1 引言

光子交换技术做为一种新的网络技术,与未来的多媒体网络通信技术、HDTV 技术以及 B-ISDN 技术紧密地联系在一起.它将摆脱目前光通信网络中光→电→光的繁琐变换,并以其宽带、高速、大容量的特点取代电交换,在网络通讯中起到关键作用.尤其数据包交换及 ATM 技术,对于多媒体、多种传输速率的信息交换将是至关重要的.而在光交换系统中,光开关门是必需的,用具有增益的光开关门构成的光开关系统更是引人注目.半导体增益光开关门增益高、偏置与驱动简单,因而是一种十分具有吸引力的光器件.文中研究的双区共腔半导体增益光开关门是在双稳态激光器的基础上,通过对损耗区的控制,使器件具有开关、放大、整形、限幅等新的功能,成为一种功耗小、增益高且可集成、功能多的光开关门,可用来实现高速的光学逻辑运算、光子交换、光脉冲整形放大及光脉冲发生、光时钟产生等技术与系统.

* “863”高技术资助项目

张志坚 男,1967年生,博士生,目前从事光电子技术(光 ATM 交换)研究

郭奕理 男,1934年生,教授,从事光电子技术研究

张权生 男,1939年生,副研究员,从事半导体光电子器件的研究

1993年8月24日收到初稿,1993年11月26日收到修改稿

2 半导体增益光开关的结构及工作原理

平面掩埋异质结(PBH)InGaAsP/InP 双区共腔半导体增益光开关是利用了液相外延(LPE)技术,经过二次外延而成.根据增益区和吸收区长底的相互比例变化,可以实现具有类似于磁滞回线特性的光学双稳器件或具有数字限幅放大特性的光开关器件.

双区共腔半导体增益光开关的结构如图 1 所示.

由于在器件中吸收区具有可饱和和吸收特性,可以采用电注入或光注入的方式使器件工作.在增益区电偏置条件下,可以利用由吸收区注入的入射光的作用,使器件导通:无光照时,只有增益区注入电流的大小影响载流子的分布,从而决定腔内是否产生激励,器件导通与否完全是由增益区所加偏置电流决定的;而在光注入时,光入射将在半导体中产生光生载流子,即产生光电流,此时器件导通及关断就不但是只取决于增益区偏置电流的大小,而且也决定于光生电流量,是二者共同作用的结果.在光放大模式下,增益区电流预偏置在关态双稳工作区(电流跨度)内,外来的微弱光信号将器件导通至通态,从而获得放大的光功率输出,且维持激励的导通状态.只有增益区加上反向的复位电流才能使器件关断,这样就实现了在光双稳状态下开关工作,双稳态的工作状态如下图 2 所示:

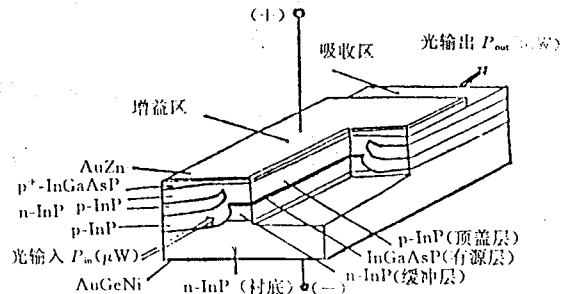


图 1 半导体增益光开关的器件结构

双稳态激光器的双稳跨度是双稳态激光器的一个重要参数,只有当跨度足够大时,作为双稳才能正常工作.而当我们将其作为光增益开关使用时,则希望其跨度愈小愈好.利用吸收区电流注入,使双稳态激光器要达到激励时所要吸收的光子数相应减少,即吸收区的饱和现象减弱,这时双稳现象将变得不明显.当吸收区注入电流足够大时,双稳现象将逐渐消失,而呈现出增益开关的特性,这正是我们所需要的.

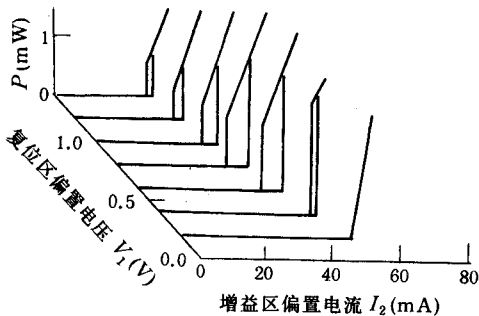


图 2 光双稳态特性

双稳跨度的理论计算可依照速率方程:

$$\begin{cases} \frac{dn_1}{dt} = \frac{j_1}{qd} - g_1s - \frac{n_1}{\tau_1} \\ \frac{dn_2}{dt} = \frac{j_2}{qd} - g_2s - \frac{n_2}{\tau_2} \\ \frac{ds}{dt} = (K_1g_1 + K_2g_2)s - \frac{s}{\tau_p} + \gamma(K_1\frac{n_1}{\tau_1} + K_2\frac{n_2}{\tau_2}) \end{cases}$$

其中 j_1, j_2 分别为两区的注入电流, n_1, n_2 分别为两区中各自的载流子浓度, g_1, g_2 分别为两区的增益系数, τ_1, τ_2 分别为两区的载流子自发复合寿命(取 $\tau_1 = \tau_2 = \tau$), τ_p 为腔内光子寿命, d 为有源区厚度, q 为电子荷量, γ 为自发发射因子.

在下面的计算中取一区为增益区, 二区为吸收区, 即 $g_1 > 0, g_2 < 0$. 对 DH 激光器, 增益系数可以近似写成线性函数:

$$\begin{cases} g_1 = a_1(n_1 - n') \\ g_2 = a_2(n_2 - n') \end{cases}$$

式中 a_1, a_2 为比例系数即增益因子, n' 为透明载流子浓度.

对速率方程归一化, 归一化因子为:

$$\begin{aligned} T = t/\tau \quad J_i = j_i/\frac{qd n'}{\tau} \quad N_i = n_i/n' \\ G_i = \tau_p g_i (i = 1, 2) \quad S = s/\frac{n' \tau_p}{\tau} \quad c = \tau/\tau_p \text{ 令 } \xi = a_2/a_1 \end{aligned}$$

则:

$$\begin{cases} G_1 = (\tau_p a_1 n') (N_1 - 1) \\ G_2 = (\tau_p a_1 n') \xi (N_2 - 1) \end{cases}$$

速率方程化为:

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dT} = J_1 - N_1 - G_1 S \\ \frac{dN_2}{dT} = J_2 - N_2 - G_2 S \\ \frac{dS}{dT} = c \{ [K_1 G_1 + K_2 G_2 - 1] S + \gamma [K_1 N_1 + K_2 N_2] \} \end{cases}$$

计算过程中用到参数:

$$\begin{aligned} K_1 = 0.8, K_2 = 0.2, \tau_p = 10^{-12} \text{s}, \tau = 10^{-9} \text{s} \\ a_1 = 1.6 \text{s}^{-1} \text{cm}^3, n' = 1.35 \times 10^{18} \end{aligned}$$

最终得到稳态解为:

$$\begin{aligned} J_1 = \frac{(1 + \tau_p a_1 n' S)}{K_1 (\tau_p a_1 n' S + \gamma)} \left\{ \left[1 + \frac{(1 - \gamma) K_1 \tau_p a_1 n'}{1 + \tau_p a_1 n' S} - \frac{(J_2 - 1) K_2 \tau_p a_1 n' \xi}{1 + \tau_p a_1 n' \xi S} \right] S \right. \\ \left. - \gamma K_2 \frac{J_2 + \tau_p a_1 n' \xi S}{1 + \tau_p a_1 n' \xi S} \right\} \end{aligned}$$

计算结果表明: 吸收区的长短、吸收区注入电流的大小、工作温度的高低以及材料参数等对双稳的跨度有明显的影响: 吸收区长度越小、吸收区的注入电流越大、工作温度越低、自发发射因子越大、有效复合系数越小、有效折射率越小、光子寿命越长则双稳跨度越小, 光增益开关门的特性越明显.

在我们的实验中采用的半导体光开关门是单电极的器件, 即只有增益区是依靠电极进行电流注入, 而吸收区的电流注入是通过增益区注入电流的泄漏来实现的. 因而, 吸收区的长度越小, 增益区泄漏的电流注入吸收区的效率越高, 器件的双稳跨度越小, 开关特性越明显. 但吸收区的长度也不能无限度地减小, 否则饱和和吸收现象将消失, 器件成为普通的激光

器了. 这种器件的工作方式与增益区和吸收区各有一个电极的双电极器件在原理上是完全相同的, 而且由于不存在电极隔离问题, 因而器件的制作复杂性大大减小. 但由于增益区与吸收区的长度比将直接影响到器件的特性, 因而必需合适地选择增益区与吸收区长度比例, 才能实现开关门的工作状态.

3 半导体增益光开关门工作特性研究

我们在实验上对双区共腔半导体光开关门的特性进行了研究. 由器件的工作原理可以看出, 改变载流子的浓度可使腔内增益发生变化. 载流子的变化可以通过改变注入电流或注入光信号幅度使腔内增益饱和来实现, 从而实现很好的增益开关特性. 后者的优点在于高的光子密度形成低的载流子寿命, 因而下降的时间远小于上升时间, 而利用前者可以更易实现光开关的作用. 实验测出光开关在增益区电注入下的工作特性及在不同增益区电偏置下的注入光功率(吸收区注入)与输出光功率曲线如图 3 所示.

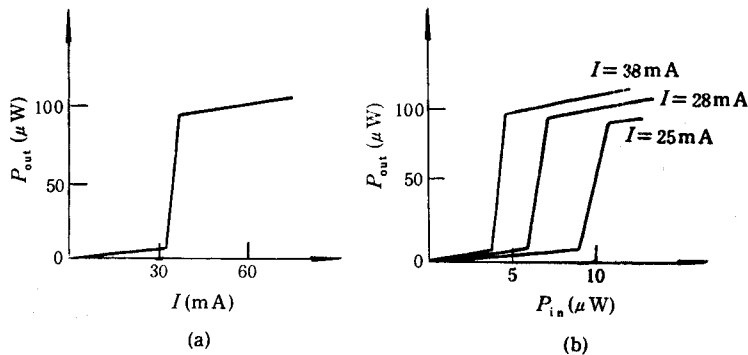


图 3 器件的开关放大特性

(a) 增益区电注入下的工作特性 (b) 直流偏置下注入光/输出光曲线特性

由图(b)可见, 输出光在高态的输出光功率几乎不随注入光的变化而改变, 其光限幅和整形作用是十分明显的. 而当注入光一定时, 是否有偏置决定开关门是否打开. 实验还发现器件对输入光的偏振特性并不很敏感, 但温度对器件特性却有较大的影响. 对不同温度下的阈值电流 I_{th} (无光注入下通过增益区电流注入使输出光从低态跃向高态时的电流值) 进行测试, 可以得出其随温度的变化如图 4 所示.

由于温度的增加, 使得增益系数降低, 所以阈值电流上升.

对不同温度下的激光光谱的测量结果如图 5 所示. 可见随温度的上升, 波长向长波方向移动, 且 $\Delta\lambda/\Delta T \approx 3.8 \text{ \AA}/^\circ\text{C}$. 这是由于温度的增加对禁带宽度及费米能级都有影响, 随着温度的上升使得禁带宽度变窄, 则激光波长向长波方向移动.

4 利用半导体增益光开关门进行的光交换原理实验

利用双区共腔半导体增益光开关门, 我们进行了光交换的原理性实验, 实验中采用的半

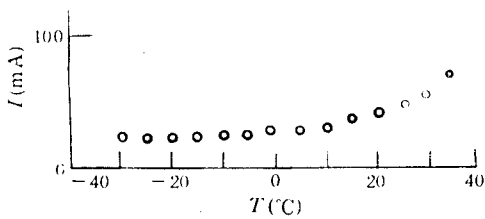


图 4 阈值电流与温度关系

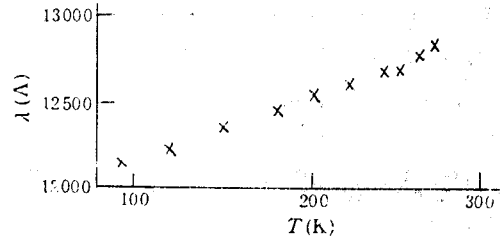


图 5 激光光谱与温度关系

导体光开关放大器的管芯长约 0.25mm, 增益区与吸收区的长度之比大约为 2:1—4:1, 器件封装于标准的 DIP14 的半导体激光器管壳中, 内装有热敏电阻和半导体致冷器, 单模光纤单端耦合输出, 输入输出的耦合效率约为 10%. 器件的工作波长为 1276.3nm, 激光电流阈值为 31.3mA, 在阈值左右器件关态与开态的出纤光功率分别是 5.1μW 和 117.0μW, 开关比或消光比为 13.6dB. 用高频电信号激励时, 得到良好的光脉冲数字调制, 从示波器上读出的脉冲信号的上升时间与下降时间(T_{on} , T_{off})均小于 2.2ns(受探测器与示波器的限制), 这就可以满足目前光子系统交换的要求了.

开关激光器的偏置电流, 工作温度, 触发方式等条件决定了器件的工作状态. 器件的工作温度直接影响增益区和吸收区的特性, 导致工作阈值、光谱特性、增益系数以及开关特性(例如双稳回线, 开关比)等性能的变化, 我们根据实用要求把器件恒温控制于 10.00°C—20.00°C 之间的某定值, 控温精度优于 $\pm 0.01^\circ\text{C}$, 从而使激光器全日 24 小时工作时的性能保持不变, 满足系统工作的要求.

光开关实验的触发源是一只波长为 1273.7nm 的 InGaAsP/InP 半导体激光器, 器件工作阈值为 19.0mA, 实验中的直流偏置为 39mA, 调幅输出的最大光纤输出功率为 1.5mW. 单端耦合输出的增益开关门与一个 2×2 的 X 型单模光纤耦合器组成可输入输出的光学开关组件, 增益开关门管芯的最小触发光功率约为 $3\mu\text{W}$, 输入开关组件的最小触发光功率不小于 $6\mu\text{W}$. 由于开关放大器单端耦合输入输出, 经 X 型耦合器时存在着 6dB 的往返损耗, 因而整个组件光纤输入输出的最大净增益为 -0.11dB. 实验还表明: 由于饱和和吸收区的存在, 器件对触发光的偏振态不敏感.

我们用光开关门对 34Mb/s 和 155Mb/s 光脉冲数字信号进行了开关传输的实验, 其中包括逐比特(一字一符)和一字多符的控制传输实验, 通过改变偏置与控温条件, 可以实现异相控制. 实验结果如图 6 所示.

其中左图为一字三符的开关传输实验, 右图为一字四符及一字八符的数据包开关传输实验, 图中由上至下第一行波形为开关控制信号, 第二行波形为输出光信号, 第三行波形为输入光信号. 最后, 我们提出一种采用了半导体增益光开关门构成的简单、可靠、性能优良的实际系统结构. 同原理性实验相同: 系统不仅可以进行逐比特的交换而且还能做一字多符交换, 从而可望实现 ATM 光子交换系统. 系统原理如图 7. 在系统中实现以光纤耦合器、光纤延迟线和半导体激光器为主体的光子交换.

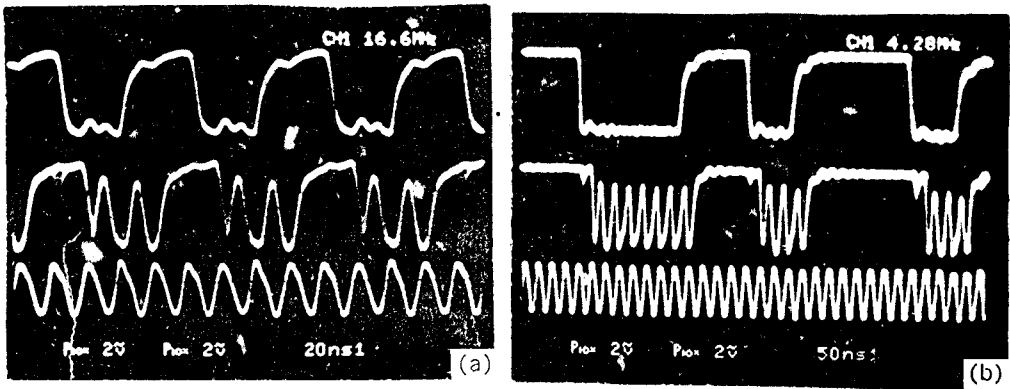


图 6 利用光开关门进行的开关传输实验
 (a)一字三符开关传输 (b)一字四符/八符开关传输

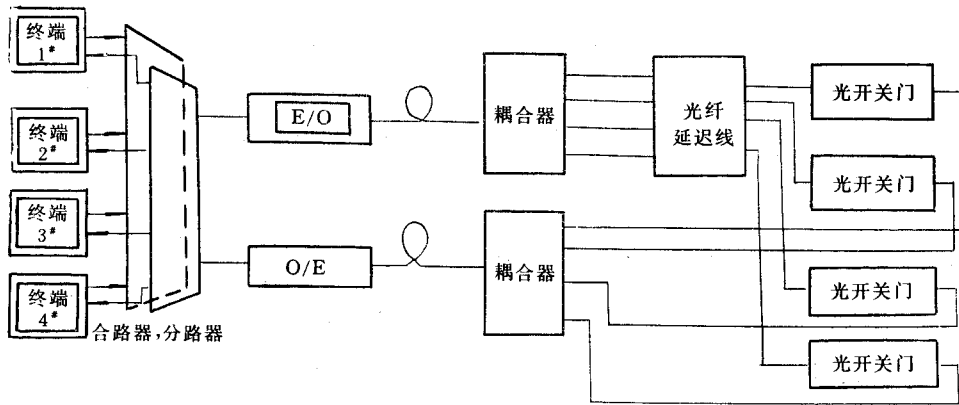


图 7 用半导体增益光开关门构成的光时分包交换系统结构原理图

5 结论

通过实验研究了半导体增益光开关门的工作特性,其中包括其偏置特性、温度特性、偏振特性、放大整形特性等,着重研究了其增益开关特性,证明其是一种具有很大潜力的光交换器件,并由此构成了一种可以完成数据包交换及 ATM 的时分光子交换系统。

参 考 文 献

- [1] 李建蒙,彭怀德,王启明,半导体学报,1987,8(2):222.
- [2] 王守武,吴荣汉,张权生等,半导体学报,1986,7(2):147.
- [3] 王守武,王启明,林世鸣,半导体学报,1986,7(2):136.
- [4] M. Eiselt, A. Ehrhardt, G. Grobkopf, *et al.*, ECOC' 92 We B8. 1.
- [5] C. Joergensen, T. Durhuus, B. Fernier, *et al.*, ECOC' 92 We B8. 2.

Experimental Study of Semiconductor Optical Gain on/off Gate in Photon Switching System

Zhang Zhijian, Zhang Chaoyang, Guo Yili and Zhou Bingkun

(*Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084*)

Zhang Quansheng and Wu Ronghan

(*Institute of Semiconductor, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083*)

Received 24 August 1993, revised manuscript received 26 November 1993

Abstract The dynamic and static optical properties of CCTS semiconductor optical gain switching gate have been studied. Especially we discussed the possibility of employing the optical switching gate to realize a kind of pocket switching for the first time. Primary experiments for optical fiber communication based on these switches have been carried out and some experimental results are achieved. A new proposal of photonic switching system is presented as well.

PACC: 4255P, 4256P, 6860, 7155