

GaAs/GaAlAs pnpn 负阻激光器中的光开关、光双稳特性*

王守武 吴荣汉 张权生 洪坚 李照银

(中国科学院半导体研究所)

1985年5月21日收到

本文首次报道了利用 PnPn 型 GaAs/GaAlAs 激光器件实现光双稳及光开关工作的实验结果以及采用双光晶体管模型对于器件的光双稳、光开关作用原理的一般性分析。

一、引言

近年来,随着光电子器件及其应用的迅速发展,光学双稳态(包括光放大、光开关)的研究引起了人们越来越多的重视,其原因在于它不但具有丰富的物理内容,而且在光学信息处理,光存储及数据处理等方面具有广阔的应用前景。其中,利用半导体光学非线性特性(如可饱和吸收、非线性增益、非线性色散效应等)与某些光学正反馈作用(如 F-P 谐振腔、分布反馈等)相结合所获得的双稳态称为本征型双稳态^[1-4]。将某些光电器件进行内组合或外组合,利用其光电参数的非线性与电学或光学的正反馈作用而实现的双稳态,称为混合型光双稳态^[5,6]。

我们在自行设计的具有低激射阈值的 GaAs/GaAlAs pnpn 负阻激光器的基础上^[7],适当变动某些结构参数,改进器件设计,首次研究了由于光照在 pnpn 器件内部因电学正反馈作用增强而产生的光学双稳态及光开关特性。实验表明,器件具有良好的双稳及开关特性。在本文中,我们对器件的双稳工作原理进行一般性描述,并对实验结果进行讨论。

二、器件设计及工作原理

器件结构如图 1 所示。从结构可以看到,该器件具有良好的电导通特性及良好的激射特性相兼容的特点^[7]。采用液相外延技术,在 n-GaAs 衬底上生长六层结构,按一般双异质结激光器工艺,制备这种器件。用大写字母 P 或 N 表示宽禁带材料 GaAlAs,用小写字母 p 或 n 表示 GaAs,则按生长顺序,器件结构可表示为 NpPpnP,其中, NpP 具有通常的双异质结激光器(DH)结构,激射区为 p-GaAs 层。通过适当设计,使电子在该区具有接近完全限制而空穴则被完全限制; NpPpn 组成基区包含 pPp 异质结构的宽禁带

* 中国科学院科学基金资助。

发射结晶体管(下称第一晶体管); PnpPp 组成具有宽禁带发射结及收集区包含 pPp 异质结构的晶体管结构(下称第二晶体管)。在光照作用下, 该器件相当于具有内相关作用的双光晶体管及激光器的组合, 如图 2 所示。

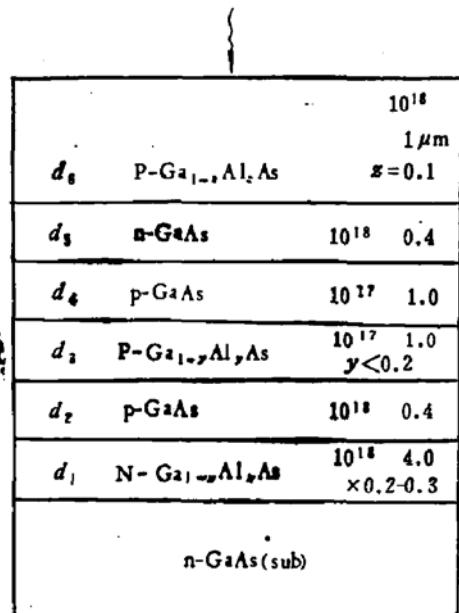


图 1 器件结构示意

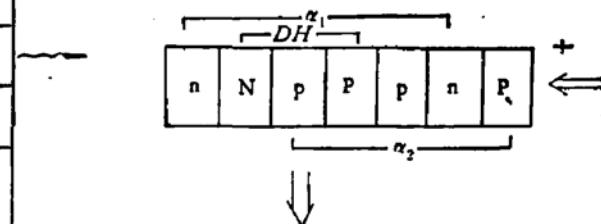


图 2 器件内组合

在无光照作用下, 器件内含第 1、第 2 晶体管的共基极直流短路电流放大系数 α_1 , α_2 分别为^④

$$\alpha_1 = \left[1 + \frac{d_2 d_3}{L_2^2} e^{\frac{\Delta E_y}{kT}} \right]^{-1}, \quad (1)$$

$$\alpha_2 = 1 - \frac{d_p^2}{2 L_p^2 \left(1 + \frac{p}{n_0 + p} \right)}. \quad (2)$$

其中, d_2 、 d_3 、 d_5 分别为对应层厚度, L_2 为电子在第 1 晶体管基区中的扩散长度, ΔE_y 为激光器有源区侧电子限制层势垒高度, L_p 为空穴在第 2 晶体管基区中的扩散长度, p 、 n_0 分别为第 5 层中注入空穴及平衡电子浓度。对于本器件设计, α_1 近似为零, 但不能为零; 而 α_2 接近于 1。

pnpn 器件由关态到通态的条件为

$$\alpha_1 + \alpha_2 \gtrsim 1. \quad (3)$$

可以采用两种方式实现这一要求。(1) 电触发, 即利用器件在外加正向电压下, 中间结(反偏置)的雪崩倍增作用, 引起 α_1 、 α_2 的增大, 如[7]所述那样;(2)光触发, 即光的作用引起器件导通。在无光照作用下, 器件的导通和关断过程的电学反馈量的变化(也即 α_1 、 α_2 随电流的变化)完全受制于外加偏置电流的作用^[7, 9]。在光照作用下, 双晶体管可以考虑为双光晶体管(光入射双基区), 此时, 器件导通及关断所需要的电反馈量的变化不但取决于电偏置电流, 而且也决定于光生电流量(同方向), 也即二者共同的作用。因此, 使器件处于通态工作的条件式(3)所要求的电偏置电流 I_{op} 较无光照时所需要的维持电流 I_H 为小。在导通过程中, 外加偏置控制着器件内电学反馈量的大小, 显见, 光强较大时, 为满

足(3)式所需要的电反馈量较小,即偏置电压较小,而在导通后,为维持导通状态所需要的最小偏置电流(即维持电流)也将随光强的增大而减小。由于器件导通及关断的起始条件及过程条件不同,因此导致器件导通及关断所对应的光功率不同(给定电偏置)。器件导通后,较强的电学正反馈使导通状态在较宽的光强范围内维持。所以,由于光照作用下,器件非线性电参数 α_1 、 α_2 的变化(随电流增加而增加)及双光晶体管在这种情况下的电学正反馈作用是使器件能够光学双稳及光学开关工作的基础。设在强光照下维持器件通态的最小电流为 I_{op} , 无光照下,维持通态的最小电流为 I_H , 则当器件在通态时,外偏置电流 I 满足

- a) $I_{op} < I < I_H$, 双稳态工作;
- b) $I_H < I$, 开关态工作;

因此,在光作用下,控制外加偏置状态可使器件分别处于双稳或开关态工作。

对于本器件结构设计,其特点在于 $\alpha_2 \geq 1$, $\alpha_1 \leq 0$, 因此,在开关,双稳工作中,第 2 晶体管起主导作用。

上面,对于器件双稳,开关工作的物理机制作了说明,主要讨论了电反馈作用。至于器件处于发光状态的光反馈作用,就我们的器件设计而言,处于次要地位。

值得说明的是,认真分析光作用下的 α_1 、 α_2 的变化以及双光晶体管的相互作用问题,宜采用电荷控制理论,如文献[9]所做的那样,求解电荷控制方程,则可得到光学双稳及光学开关的较为严格的数学表示式。下面,对光照作用引起的维持电流的降低作较为详细的描述。

根据电荷控制理论,采用双晶体管模型分析图 2 所示的器件,则可得

$$\frac{Q_n}{t_n} + aL = \frac{dQ_p}{dt} + \frac{Q_p}{\tau_p}, \quad (4)$$

$$\frac{Q_p}{t_p} + bL = \frac{dQ_n}{dt} + \frac{Q_n}{\tau_n}. \quad (5)$$

其中, Q_n 为晶体管 1 基区中的电子电荷, Q_p 为晶体管 2 基区中的空穴电荷, t_n 、 τ_n 分别为晶体管 1 基区中的电子渡越时间及平均寿命, t_p 、 τ_p 分别为晶体管 2 基区中的空穴渡越时间及平均寿命, L 为人射光通量。 a 、 b 为与光生载流子产生有关的常数,并认为接近反向结附近的光生载流子对光生电流的贡献起主要作用。

组合(4)及(5),可得

$$\begin{aligned} \frac{d^2Q_n}{dt^2} + \left(\frac{1}{\tau_n} + \frac{1}{\tau_p}\right) \frac{dQ_n}{dt} - \left(\frac{1}{t_n \cdot t_p} - \frac{1}{\tau_n \tau_p}\right) Q_n \\ = L \left(\frac{b}{\tau_p} + \frac{a}{t_p}\right), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2Q_p}{dt^2} + \left(\frac{1}{\tau_n} + \frac{1}{\tau_p}\right) \frac{dQ_p}{dt} - \left(\frac{1}{t_p \cdot t_n} - \frac{1}{\tau_n \tau_p}\right) Q_p \\ = L \cdot \left(\frac{a}{\tau_n} + \frac{b}{t_n}\right). \end{aligned} \quad (7)$$

在稳态情况下

$$Q_n = \frac{\tau_n \cdot \tau_p}{-G} \left(\frac{b}{\tau_p} + \frac{a}{\tau_n} \right) L, \quad (8)$$

$$Q_p = \frac{\tau_n \cdot \tau_p}{-G} \left(\frac{a}{\tau_n} + \frac{b}{\tau_p} \right) L. \quad (9)$$

其中, $G = \frac{\tau_n \tau_p}{t_n t_p} - 1$ 称为剩余回路增益, 考虑到宽带发射结作用, 认为发射极注射效率近似为 1, 则 $G \approx \beta_n \beta_p - 1$, (β 为基区输运系数, $\beta_n = \tau_n / t_n$, $\beta_p = \tau_p / t_p$).

流过器件总电流为

$$I = \frac{Q_n}{t_n} + \frac{Q_p}{t_p} + L(a + b). \quad (10)$$

将式(8)、式(9)的 Q_n 、 Q_p 代入式(10)可得

$$I = \frac{L[a(1 - \alpha_1) + b(1 - \alpha_2)]}{1 - \alpha_1 - \alpha_2}. \quad (11)$$

从式(11)可以看到, 无光照时, 为使器件导通, 则要求 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$, 即 I 不为零. 在光照作用下, $\alpha_1 + \alpha_2 < 1$ 便可满足 I 不为零的条件. 如果令 $a = b$, 则更能说明此点, 即

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \frac{I - 2aL}{I - aL}.$$

无光照下,

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1,$$

有光照下

$$\alpha_1 + \alpha_2 < 1.$$

由于 α_1 、 α_2 都随电流的增加而增大, 因此, 光照时, 维持通态的最小电流, 将比无光照时要小. 现在, 对光照下, 维持电流的降低作粗略的估计.

设在接近稳态的小电流范围里, $1 - (\alpha_1 + \alpha_2)$ 的变化正比于 $(I_H - I)$, 即 $[1 - (\alpha_1 + \alpha_2)] = A(I_H - I)$, 其中, I_H 为暗维持电流, A 为比例常数. 此时, 将 (11) 改写为

$$A(I_H - I)I = L[a(1 - \alpha_1) + b(1 - \alpha_2)].$$

其解为

$$I = \frac{I_H \pm \sqrt{I_H^2 - 4 \frac{L}{A} [a(1 - \alpha_1) + b(1 - \alpha_2)]}}{2}$$

$$\approx \frac{I_H \pm \sqrt{I_H^2 - 4 \frac{aL}{A}}}{2}.$$

考虑通导后的稳态, 则

$$I = \frac{1}{2} \left(I_H + \sqrt{I_H^2 - \frac{4aL}{A}} \right)$$

有意义.

无光照下, $L = 0$, $I \approx I_H$,

强光照下, 即 $L \rightarrow I_H^2 A / 4a$, 则 $I_H > I \gtrsim 1/2I_H$.

三、实验结果及讨论

实验中,所用器件为宽接触器件,光照由顶端入射,侧向出光。

1. 器件由关态到通态的静态伏-安特性如图 3 所示。器件暗特性参数为导通电压 V_s : 10—20 V; 导通电流 I_s : 50—100 μ A; 维持电压 V_H : 1.5V; 维持电流 I_H : 10—200 mA。从图 3 可以看到,随着光强的增加,导通电压降低,通态压降为 1.5V; 表现出良好的光开关特性。因此,器件在通态工作时,结功耗很小。

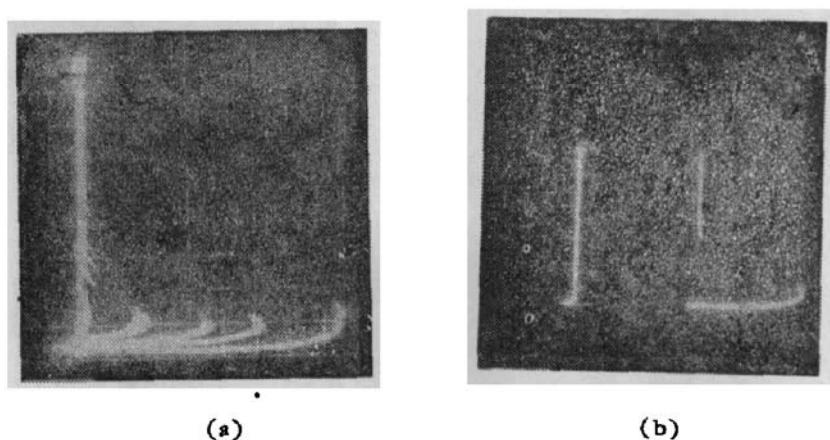


图 3 静态伏-安特性

(a) x 2V/cm y 1mA/cm 输入光强(自右向左) 0, 100, 170, 400, 550, 850 μ W
 (b) x 5V/cm y 2 mA/cm

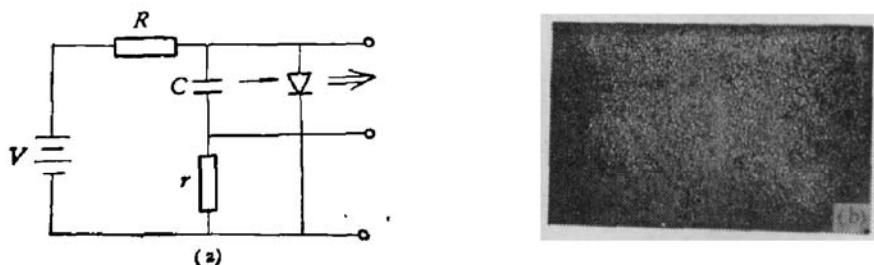


图 4 自振激光

(a) 自振激光回路 (b) 激射远场图

$$V > V_s, I_H > \frac{V}{R}, r = 1\Omega, C = 100 - 10000 \text{ pF}$$

2. 在器件作为光-光开关使用时,器件工作在大于暗维持电流范围,由于本器件的激光阈电流密度很低^[7](对于厚度为 0.4 μ m 的有源区, $J_{th} = 2500 \text{ A/cm}^2$), 体串联电阻很小,因此,如适当控制外路负载,则器件本身所供电流可大大超过通态时激射所需的电流,引起受激发射,如果将器件置于图 4 所示的 RC 自振回路^[8], 在光照下,产生自振激光。其自振激光远场图如图 4 所示。

3. 直流光-光双稳特性

从图 3 可以看到,器件通态维持电流 I_H 是随光强的增加而减小的,适当控制外加偏置电流使器件导通后的电流范围为

$$I_{op} < I < I_H.$$

这样器件能在光双稳状态下工作，其中， I_H 为暗维持电流， I_{op} 为强光作用下，器件完全导通所需的最小电流 ($I_{op} \approx 1/2 I_H$)。 I 为器件导通后外加偏置电流。

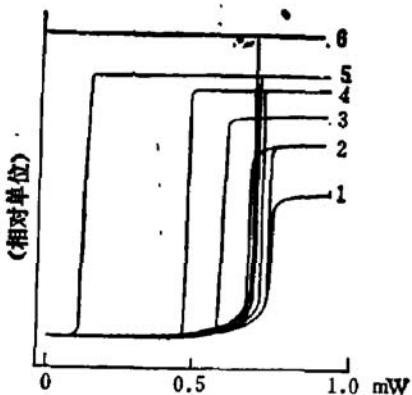


图 5 直流光-光双稳特性

x 输入光强 y 输出光强(相对单位)
1—5：双稳态器件电流由 10 mA 增至 28 mA
6：开关态工作电流大于暗维持电流($I_H=30\text{mA}$)

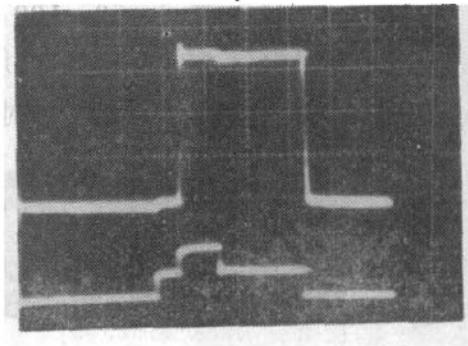


图 6 脉冲光-光双稳特性

上光输出(相对单位)
下光输入 $x 10 \mu\text{s}/\text{格}$
 $y 0.5 \text{mW}/\text{格}$

图 5 为直流光-光双稳特性实验曲线，从该图可以看到。1—5 对应着不同偏置电流得到的具有不同跨度的双稳曲线，曲线 6 对应在较大偏置电流下，器件进入开关态工作（光照取消后，器件仍维持通态）。因此双稳跨度易于控制。双稳输出即可以为光讯号，也可为电讯号。这无疑给实际应用带来很大方便。

4. 脉冲光-光双稳特性。

脉冲光-光双稳实验示波器图形如图 6 所示。这实际上是光数据处理功能实验。其电偏置情况同于直流光-光双稳特性测量，而光输入则采用阶梯波形式；它相当于两个光脉冲注入，而每个光脉冲强度都不足以使器件完全光导通，但当两个光脉冲叠加使器件完全导通后，则在较低光强的单个脉冲作用下仍可维持通态，直到光注入消失，器件回到关态。如单个光脉冲强度足够大，则器件表现出良好的光整形作用。光输出上升前沿与光输入强度有关。初步测量表明，在一定光强下，可在 ns 量级，有关器件光动态特性。将另文讨论。

四、结 束 语

采用自行设计的具有低激射阈值的 GaAs/GaAlAs pnpn 负阻激光器，首次实现了 pnpn 器件的光-光双稳及光-光开关工作，并采用双晶体管模型，对于器件在各种状态下工作的原理进行了一般性分析。实验结果表明，该器件具有多功能特性。它能将发光、接收、放大、双稳、开关等功能有机地集合起来。并且工艺简单，操作方便。因此，它不但可以作为高速光源 (ns 量级)，而且可以作为光增强器，光双稳器，光开关器等，在光信息处理、光存储、光整形及光数据处理等方面得到广泛应用。

本工作得到半导体所七室工艺组及徐俊英、张敬明等同志的支持和帮助,王启明副教授审阅本文,并进行了有益讨论,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] C. Harder, K. Y. Lau and A. Yariv *IEEE Q-E*, **QE-18**, 1351 (1982).
- [2] S. D. Smith and A. C. Walker, *ICO-13*, B5—10, 447 (1984).
- [3] H. Kawaguchi and G. Iwane *Electronics Letters*, **17**, 167 (1981).
- [4] H. M. Gibbs et al., *Appl. Phys. Lett.*, **35**, 451 (1979).
- [5] A. Kio Sasaki et al., *IEEE Trans.*, **ED-29**, 1382 (1982).
- [6] K. Y. Lau and A. Yariv *Appl. Phys. Lett.*, **45**, 719 (1984).
- [7] 王守武, 吴荣汉, 朱其高, 张权生, 李照银, 田惠良, 电子学报, **3**, 35(1979). *IEE Proc.*, **129**, 806 (1982).
- [8] T. Moriizumi and K. Takahashi *IEEE Trans.*, **ED-19**, 152 (1972).
- [9] 王守武, 张权生, 李照银, 吴荣汉, *IEE Proc. Optoelectronics*, **132**, PartJ, 69(1985).

Optical Bistability and Switching Characteristics of a GaAs/GaAlAs pnpn Negative Resistance Laser

Wang Shouwu Wu Ronghan Zhang Quansheng

Hong Jian and Li Zhaoyin

(Institute of Semiconductors Academia Sinica)

Abstract

We report for the first time some experimental results on the optical bistability and switching characteristics of a pnpn type GaAs/GaAlAs laser device, and based on the double phototransistor model, a general analysis is given to the physical description about the optical bistability and switching operations in the device.