

光触发 GaAs/GaAlAs 异质结负阻激光器

张权生 吴荣汉 李照银

(中国科学院半导体研究所)

提要: 采用 GaAs/GaAlAs 多层液相外延技术研制成一种光触发异质结负阻激光器。文中简述了器件的工作原理和某些特性。

Light-activated GaAs/GaAlAs heterostructure negative resistance lasers

Zhang Quansheng, Wu Ronghan, Li Zhaoyin

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

Abstract: A light-activated GaAs/GaAlAs heterostructure negative resistance laser has been made by horizontal liquid-phase epitaxial growth. The operation principle and some of the characteristics of the device are described.

一、引言

本文报道一种利用外部光照使器件导通的 GaAs/GaAlAs 异质结负阻激光器。在无光照情况下这种激光器的正向伏安特性曲线具有明显的负阻区(图 1), 其中 V_s 和 I_s 分别称作转折电压和转折电流, V_H 和 I_H 分别称作维持电压和维持电流。在光照条件下 V_s 和 I_H 均明显降低, 亦即负阻区明显减小。因此这种器件既可作为电触发 shockley 二极管激光器使用, 又可以光闸流管激光器方式工作。

激光器是采用 GaAs/GaAlAs 多层液相外延技术制备, 结构如图 2(a) 所示。n. GaAs 衬底掺 Si, 掺杂浓度 $2 \sim 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。从

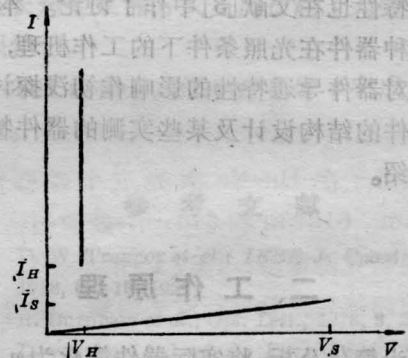


图 1 无光照时负阻激光器的正向伏安特性

左至右六个外延层中的前五层, 即 $N. \text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As} / P. \text{GaAs} / P. \text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{As} / P. \text{GaAs} / n. \text{GaAs}$ 组成本器件的第一晶体管; 从右至左的五层, 即 $P. \text{Ga}_{1-z}\text{Al}_z\text{As} / n. \text{GaAs} / P.$

收稿日期: 1985 年 5 月 9 日。

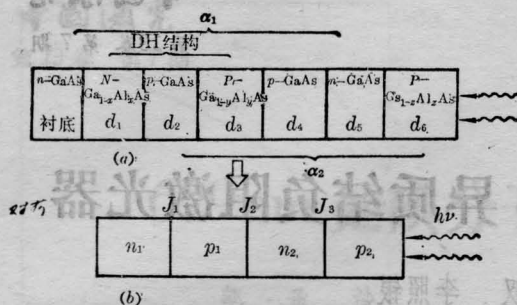


图 2

(a) 器件结构

(b) 其简化模型

GaAs/P. Ga_{1-y}Al_yAs/P. GaAs 组成第二晶体管。在第一晶体管中所包含的 N. Ga_{1-x}Al_xAs/P. GaAs/P. Ga_{1-y}Al_yAs 部分具有典型的双异质结 (DH) 激光器结构, 激射有源区是其中的 P. GaAs 层。

显然上述器件结构与电触发低阈值 GaAs/GaAlAs PNP 负阻激光器^[1,2] 大体相同, 只不过有些层次的参数 (浓度、厚度及 Al 含量等) 要重新设计, 因此两种器件的激射特性以及导通特性等应基本相同。在文献 [1, 2] 中我们已对这种多异质结 PNP 二极管在电压触发下的导通机理作了分析, 而其激射特性也在文献 [3] 中作了讨论。本文仅就此种器件在光照条件下的工作机理, 亦即光照对器件导通特性的影响作初浅探讨, 并对器件的结构设计及某些实测的器件特性作些介绍。

二、工作原理

为简化分析, 将实际器件简化为 $n_1p_1n_2p_2$ 四层结构 (图 2(b)), 其中 p_2 仍为宽带隙材料。按照双晶体管模型, $n_1p_1n_2$ 组成共基极直流短路电流放大系数为 α_1 的第一晶体管, $p_2n_2p_1$ 组成共基极直流短路电流放大系数为 α_2 的第二晶体管。在 J_1 和 J_3 两结处于正偏、 J_2 结反偏且无光照情况下, 到达 J_2 结左侧的电子电流为 $\alpha_1 I + I_{Rn}$, 到达右侧的空穴电流为

$\alpha_2 I + I_{Rp}$, 其中 I 为流过器件的总电流, I_{Rn} 和 I_{Rp} 分别为 J_2 结反向饱和电流中电子电流和空穴电流。设 M_1 和 M_2 分别为 J_2 结反偏时电子电流和空穴电流的雪崩倍增因子, 则有

$$I = M_1(\alpha_1 I + I_{Rn}) + M_2(\alpha_2 I + I_{Rp})$$

于是

$$I = \frac{M_1 I_{Rn} + M_2 I_{Rp}}{1 - (M_1 \alpha_1 + M_2 \alpha_2)} \quad (1)$$

设在某一低于转折电压的偏置电压下有一束光垂直入射在 p_2 表面上, 并设光子能量小于 p_2 区带隙而大于或等于 n_2 区带隙, 则光吸收主要发生在 n_2 区及 J_2 结转变区, 产生的光电流为 $I_{ph} = I_{pn} + I_{pp}$ 式中 I_{pn} 和 I_{pp} 分别为光生电子电流和空穴电流。因此在光照情况下流过器件的总电流变为

$$I' = M_1(\alpha_1 I' + I_{Rn} + I_{pn}) + M_2(\alpha_2 I' + I_{Rp} + I_{pp})$$

$$\text{令 } \alpha_1' I' = \alpha_1 I' + I_{pn}$$

$$\alpha_2' I' = \alpha_2 I' + I_{pp}$$

则上式可写作

$$I' = M_1(\alpha_1' I' + I_{Rn}) + M_2(\alpha_2' I' + I_{Rp})$$

于是得

$$I' = \frac{M_1 I_{Rn} + M_2 I_{Rp}}{1 - (M_1 \alpha_1' + M_2 \alpha_2')} \quad (2)$$

对照 (2) 式和 (1) 式可知, 有光照和无光照情况下流经器件的电流满足类似的函数关系。因此其伏安特性应具有类似的变化规律, 而且在伏安特性曲线的各个区应满足类似的变化关系。亦即, 在关态区:

$$M_1 \alpha_1' + M_2 \alpha_2' < 1$$

在负阻区: $M_1 \alpha_1' + M_2 \alpha_2' \approx 1$

在通态区: $\alpha_1' + \alpha_2' > 1$

在转折点附近以及负阻区, 应近似满足

$$M_1 \alpha_1' + M_2 \alpha_2' = 1$$

对 GaAs 等材料, 电子电流和空穴电流具有相同的雪崩倍增因子:

$$M_1 = M_2 = M$$

再取 Miller 近似^[4]:

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V}{V_B}\right)^n}$$

则在光照情况下有

$$V'_s = V_B [1 - (\alpha'_1 - \alpha'_2)]^{1/n} \quad (3)$$

而在无光照情况下的对应关系式为

$$V_s = V_B [1 - (\alpha_1 + \alpha_2)]^{1/n} \quad (4)$$

式中 V_B 为 J_2 结击穿电压, n 为与材料特性、杂质分布等有关的常数。由于 I_{pn}/I' 和 I_{pp}/I' 均是大于 0 的正数, 亦即 $\alpha'_1 > \alpha_1$, $\alpha'_2 > \alpha_2$, 因此有

$$V'_s < V_s$$

亦即光照将使器件的转折电压降低, 降低的量为

$$\begin{aligned} \Delta V &= V_s - V'_s \\ &= V_B \{ [1 - (\alpha_1 + \alpha_2)]^{1/n} \\ &\quad - [1 - (\alpha'_1 + \alpha'_2)]^{1/n} \} \end{aligned}$$

将 $[1 - (\alpha_1 + \alpha_2)]^{1/n}$ 和 $[1 - (\alpha'_1 + \alpha'_2)]^{1/n}$ 均在 1 附近作级数展开, 并取一级近似, 则得

$$\begin{aligned} \Delta V &\simeq \frac{V_B}{n} [(\alpha'_1 + \alpha'_2) - (\alpha_1 + \alpha_2)] \\ &= \frac{V_B}{n} \cdot \frac{I_{ph}}{I'} \quad (5) \end{aligned}$$

这表明, 转折电压的降低与光电流成正比。一般而言, 光电流又与入射光功率成正比增大, 所以转折电压的降低应与入射光功率成正比。

光照下器件维持电流的降低也具有类似的机理, 在文献[5]中对此作了分析。

将(1)、(2)两式联立, 可得

$$I' = I + \frac{MI_{ph}}{1 - M(\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (6)$$

上式右边第二项正是光电流的贡献, 而第一项在光触发工作条件下仅起预偏置作用。由于在光照条件下雪崩作用已退居次要地位, 因此器件中两个晶体管的电流放大能力对器件的性能将起决定性的作用。通过求解实际器件中两个晶体管的电流连续性方程, 我们得到^[1,2]:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &\simeq \left[1 + \frac{d_2 \cdot d_3}{L_n^2} e^{\frac{\Delta E_v}{kT}} \right]^{-1} \\ \alpha_2 &\simeq 1 - \frac{d_5^2}{2L_p^2} \left(1 + \frac{p}{n_n^0 + p} \right)^{-1} \end{aligned}$$

式中 d_2 、 d_3 和 d_5 分别为 p. GaAs (有源区)、p. Ga_{1-y}Al_yAs 及 n. GaAs (第二晶体管基区) 的厚度, ΔE_v 为 p. GaAs/p. Ga_{1-y}Al_yAs 异质结导带势垒, L_n 和 L_p 分别为电子和空穴扩散长度, n_n^0 为 n. GaAs 中电子平衡浓度, p 为注入该基区中的平均空穴浓度。显然 $\alpha_2 \gg \alpha_1$, 而且通过设计可使 α_2 在相当宽的电流范围内均具有较大的接近于 1 的数值。故对于第一晶体管而言, 仅需提供较小的 α_1 值就能满足器件完全导通的要求, 从而使这种激光器有良好的电学导通特性和良好的激励特性。

表征这种器件性能的重要参数之一是使器件由关态导通到开态所必需的最小入射光功率 P_{\min} , 它决定器件的控制灵敏度, 粗略地可近似认为光电流等于器件的导通电流 (亦即转折电流) I_s 时发生从关态到通态的开关作用, 设 $h\nu$ 为入射光子能量, η 为光激发效率, 则由(6)式并取 $M=1$ 可得

$$P_{\min} = \frac{h\nu}{q\eta} \cdot \frac{I_s}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (7)$$

式中 q 为电子电量。若器件制备得当, 特别是 J_2 结制备质量良好, 使 I_s 低于微安量级, 则不难实现 P_{\min} 降至低于微瓦量级。

三、结构设计及参数选取

这种激光器仍为二端器件, 但阳极电极留有光照窗口, 以便接收入射辐射。从分析的角度, 这种激光器仍然可看作双异质结激光器与 PNP Shockley 二极管的纵向集成, 只不过第二晶体管在光触发工作下是一个具有异质发射结的光晶体管。

正如引言所述, 构成本器件的前四个外延层, 即 N. Ga_{1-x}Al_xAs/P. GaAs/P.

Ga_{1-y}Al_yAs/P. GaAs 与以前研制的电触发 GaAs/GaAlAs PNP 负阻激光器相同,因此这几层的参数选取也大体相同。下面主要讨论后二个外延层的参数选取问题。

(i) n. GaAs

n. GaAs 是第二晶体管的基区,考虑的主要参数是掺杂浓度和厚度。它们关系到器件的光敏性和响应特性。

n. GaAs 的浓度主要由 J₂ 结的雪崩击穿电压 V_B 决定。对液相外延生长结,采用突变结近似有

$$V_B \approx 60 \left(\frac{Eg}{1.1} \right)^{3/2} \left(\frac{N_B}{10^{16}} \right)^{-3/4}$$

式中 Eg 为禁带宽度, N_B 为轻掺杂区杂质浓度。如欲使转折电压 V_s 取值在 15~20 V 范围,则 n. GaAs 的掺杂浓度应取值约 10¹⁷ cm⁻³。

n. GaAs 的厚度 d₅ 应小于入射光的穿透深度和空穴扩散长度,但大于基区穿通临界厚度,取值 0.5~1.0 μm 则可同时满足上述要求。

(ii) p. Ga_{1-z}Al_zAs

p. Ga_{1-z}Al_zAs 为第二晶体管的宽带隙

发射区,也是器件的入射窗口层,又是器件的欧姆接触层。因此 Al 含量 Z 值及掺杂浓度的取值是至关重要的,它们直接影响器件的电导通特性和光敏特性。

p. Ga_{1-z}Al_zAs/n. GaAs 异质结注入效率 γ₃ 可写作^[1]:

$$\gamma_3 = \frac{\gamma_{03}}{\gamma_{03} + (1 - \gamma_{03}) e^{-\frac{\Delta E_z}{kT}}}$$

式中 γ₀₃ 为相应同质结注入效率,而 ΔE_z 为异质结附加势垒:

$$\Delta E_z = 1.042Z + 0.468Z^2$$

因此从提高注入效率和改善“窗口”特性的角度来看,Z 值越大越好,但过大又对电极的欧姆接触产生不利影响。我们认为选 Z ≈ 0.2 为宜。

p. Ga_{1-z}Al_zAs 层的掺杂浓度应尽量高,这样既可降低电极处的接触电阻,又可改善“窗口”处的电位均匀性。选用 Ge 为 P 型掺杂剂,可生长出载流子浓度达 5 × 10¹⁸ cm⁻³ 的 p. Ga_{1-z}Al_zAs 层,再经 Zn 扩散工艺,可使 p. Ga_{1-z}Al_zAs 层的表面浓度超过 10¹⁹ cm⁻³ 以上。

表 1 列出了器件的设计参数。

表 1

层次	衬底 n. GaAs	d ₁ N. Ga _{1-z} Al _z As	d ₂ P. GaAs	d ₃ P. Ga _{1-y} Al _y As	d ₄ p. GaAs	d ₅ n. GaAs	d ₆ P. Ga _{1-z} Al _z As
参	铝含量	z = 0.2 ~ 0.3		y ≤ 0.2			z ≈ 0.2
	掺杂 (cm ⁻³)	1 × 10 ¹⁸	10 ¹⁷	10 ¹⁷	10 ¹⁷	10 ¹⁷	5 × 10 ¹⁸
数	厚度 (μm)	4	0.4 ~ 1.0	0.8	0.5	0.8 ~ 1.0	3

四、器件特性

1. 光谱特性

以钨带灯为光源,真空热电偶为校准元件,研究了器件在关态下光谱灵敏度的响应特性。光从 p. Ga_{1-z}Al_zAs 电极窗口照射进 n. GaAs 基区内。在各种偏置电压下响应曲

线均是两端下降中间平滑。曲线的平滑段表征宽带隙 p. Ga_{1-z}Al_zAs 的“窗口”特性。在较高能量端的下降(即短波限)受 p. Ga_{1-z}Al_zAs 带隙和厚度控制,而长波限受 n. GaAs 带隙和厚度控制。实验发现,随偏置电压的增大灵敏度相应提高,且长波限向长波方向扩展。这可用光电流随偏置电压的增加而增大进行解释。

2. 光照特性

图3示出了器件的光照特性，它表征入射光功率对器件关态下伏安特性的影响。入射光源为带光纤的GaAs/GaAlAs室温连续激射双异质结激光器，光纤直径 $70\mu\text{m}$ ，激射波长约 820nm 。被照射的器件管芯长 $300\mu\text{m}$ ，宽 $200\mu\text{m}$ ，厚 $80\mu\text{m}$ 。阳极光照窗口是长 $300\mu\text{m}$ ，宽 $80\mu\text{m}$ 的矩形。器件的伏安特性用JT-1晶体管特性图示仪观测。图中器件偏置电压为 7V ，明显低于其转折电压（此器件转折电压约 12V ）。在几十微瓦功率范围已观测到明显的光照效果。

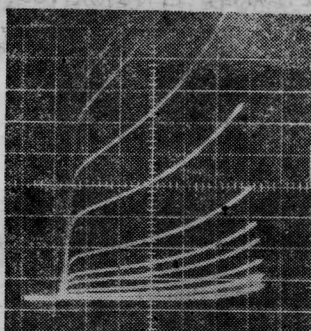


图3 正向关断区伏安特性随入射功率的变化
(EP2-5#, 横轴 $1\text{V}/\text{div}$, 纵轴 $20\mu\text{A}/\text{div}$)

入射光功率(自下至上): $0, 20, 50, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 140, 170(\mu\text{W})$

3. 控制特性

图4示出了器件伏安特性随入射光功率的变化。图5为据此画出的控制特性，即转折电压和维持电流随入射功率的变化。正如所预期的，随入射功率的增大，转折电压和维持电流均明显减小。当入射功率增大到约 1mW 时负阻态完全消失，器件显现二极管特性，其正向拐点电压约 1.4V ，与单个GaAs正向结压降对应。

4. 自振激射特性

将器件置于RC张弛振荡电路，并使负载线与负阻区相交，研究了器件的光触发自振激射特性。激射波长约 900nm ，主要由p-GaAs有源区的掺杂状况决定。自振激射光谱、近场及远场辐射图样等特性均与电触发

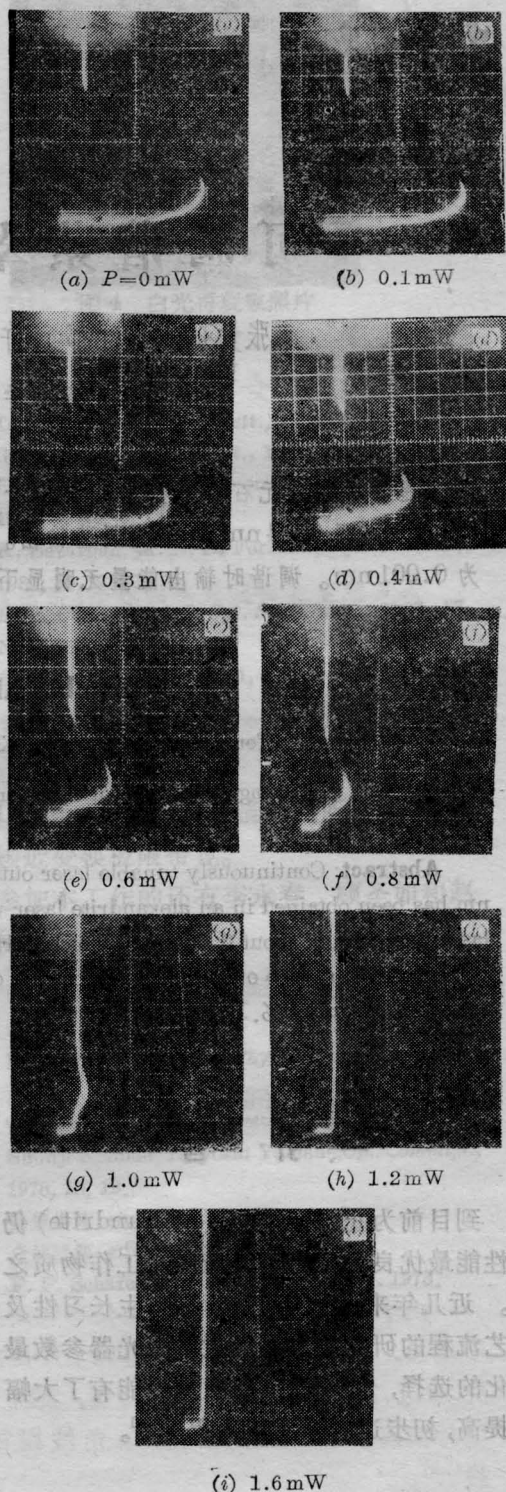


图4 入射光功率对器件伏安特性的影响
(器件EP2-5#, 横轴 $2\text{V}/\text{div}$, 纵轴 $0.5\text{mA}/\text{div}$)

(下转第400页)

由(32)式可以得到,当

$$4\gamma_0\omega_w > (1-\beta_{z0})\omega_r \quad (33)$$
 时,增益 G 为正,即

$$G > 0$$

而当

$$4\gamma_0\omega_w < (1-\beta_{z0})\omega_r \quad (34)$$

时,增益 G 为负,即

$$G < 0$$

又因为 $(1-\beta_{z0}) \approx \frac{1}{2\gamma_0^2}$ (35)

相对论因子 γ_0 总是大于1,把(35)代入(33)和(34)式,我们就发觉条件(33)能够得到满

足,而条件(34)并不被满足。这就是说,只要我们选择合适的工作条件,使得位相因子 θ_0 的变化范围是在 $0 \sim \frac{\pi}{2}$ 之间,则就有希望用一束高功率激光束同时做自由电子激光器的泵浦源和放大光束。

参 考 文 献

- [1] Luis R. Elias *et al.*; *Phys. Rev Lett.*, 1976, **36**, 717.
- [2] R. Colella, A. Lucclio; *Opt. Commun.*, 1984, **50**, 41.
- [3] 雷仕湛;《红外研究》,(待发表)。

(上接第 405 页)

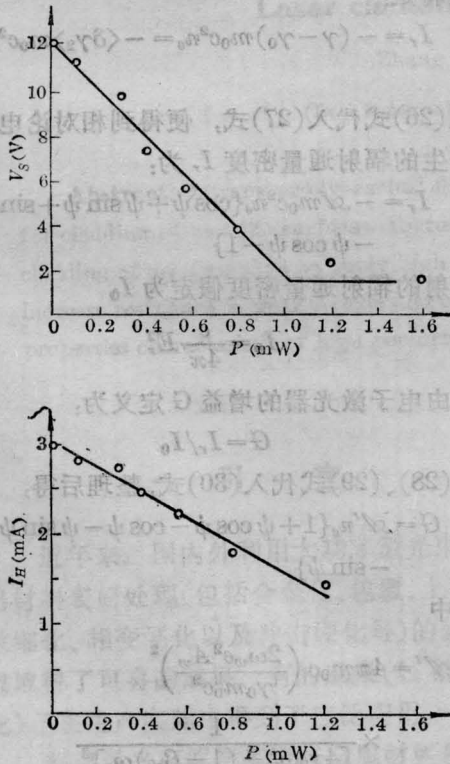


图5 器件的光控制特性
 (上) 转折电压随入射功率的变化
 (下) 维持电流随入射功率的变化

GaAs/GaAlAs PNP 负阻激光器相似^[1,2],而自振频率除仍可用外加电压电阻或电容调节外^[6],还随入射功率的增加而变大。

此外,我们还用此种器件开展了光学双稳态研究工作,其双稳特性十分良好。关于这方面的内容,请参阅文献[5]。

此文承蒙王守武教授审阅。石志文、何军等同志提供了实验用 GaAs/GaAlAs 双异质结激光器,王丽明、吕卉等同志在器件制备中给予了很多协助,作者谨致热忱感谢。

参 考 文 献

- [1] 王守武等;《电子学报》,1979, **3**, 35~43.
- [2] Wang Shouwu *et al.*; *IEEE Proc. I, Solid State & Electron Dev.*, 1982, **129**, (6), 306~309.
- [3] 张权生,吴荣汉;《第三届全国半导体化合物材料、微波器件、光电器件学术会议论文集》,1984, 240 页。
- [4] Miller S. L.; *Phys. Rev.*, 1955, **99**, 1234.
- [5] 王守武等;《半导体学报》,1986, **7**, 147~153.
- [6] Wang Shouwu *et al.*; *IEEE Proc.*, 1985, **132**, Pt. J, No. 1, 69~76.