

# GaAlAs/GaAs DH 激光器的自脉动特性

赵礼庆 王启明  
(中国科学院半导体研究所)

张存善 吴振球  
(河北大学物理系)

1981年8月12日收到

## 提 要

本文对  $L - I$  特性曲线扭折的 GaAlAs/GaAs DH 激光器光输出中自脉动振荡现象, 进行了时间分辨光谱, 瞬态近场分布的测试。根据实验结果, 用有源区 Al 含量不均匀分布而产生不同发射波长的双光丝的模型, 定性地解释了自脉动振荡的现象。

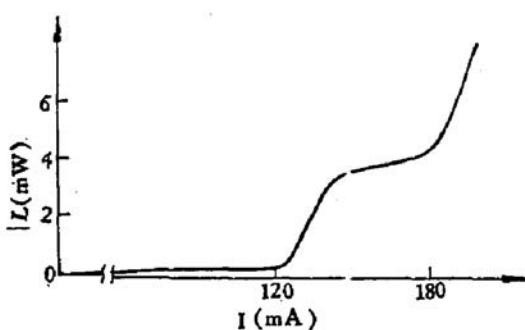
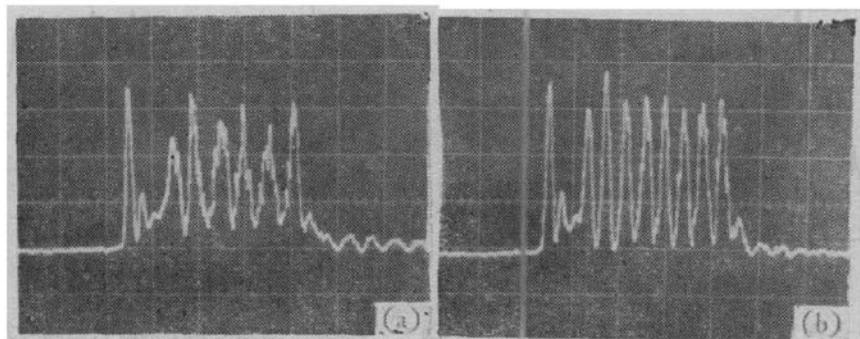
## 一、引言

GaAlAs/GaAs DH 激光器光输出中的自脉动现象, 已被很多作者观察到了。对于  $L - I$  特性曲线扭折的样品出现自脉动的现象也有报道<sup>[1]</sup>。我们研究的半导体激光器样品, 是采用液相外延工艺生长的  $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}/\text{GaAs}$  的外延片, 应用质子轰击产生高阻绝缘制成约 12—15 微米条宽, 并解理, 切割成腔长约 200—300 微米的条形结构。部分 DH 激光器  $L - I$  特性曲线出现有平台区较宽的扭折现象, 已有作者对这种扭折现象做出了定性的分析<sup>[2]</sup>, 提出了有源区 Al 含量横向不均匀分布的物理模型, 对此现象做了解释。在我们对 DH 激光器的瞬态特性的研究中, 发现了  $L - I$  特性曲线扭折的样品, 存在有类似 K. Kobayashi<sup>[3,4]</sup> 曾观察到的自脉动振荡现象, 但在发射波谱方面却有本质的不同。针对这现象, 我们进行了时间分辨光谱和瞬态近场分布等实验分析, 并得出一些有趣的新结果, 根据其结果提出了进一步定性的解释。

## 二、自脉动振荡现象

$L - I$  特性曲线扭折的 DH 激光器, 如图 1 所示。当脉冲电流幅度加到第二个扭折点以后, 光输出中就会产生一种强烈的自脉动振荡。如图 2 所示。它的特点是振幅没有明显的衰减, 有的样品的自脉动振荡的延续时间可达数百毫微秒以上, 并且自脉动的重复频率随着注入脉冲电流的幅度的增大而加快, 频率范围大约在 200MHz 到 2GHz 之间。

我们观察到的这种自脉动振荡的特点, 是在第一个光输出峰值以后, 光输出有一个小的衰减, 然后出现一系列 Q 开关式的脉冲振荡。对于这种特性的自脉动现象尚未见报道。

图 1 93-3 DH 激光器  $L$ - $I$  特性曲线图 2 DH 激光器自脉动振荡波形  
(a)  $I = 186 \text{ mA}$  (b)  $I = 190 \text{ mA}$  (2ns/格)

### 三、实验分析

根据 DH 激光器光输出中的自脉动振荡的波形, 又考虑到文献 [2] 中讨论的关于  $L$ - $I$  特性曲线出现大平台区扭转的样品, 在直流稳态散射情况下的分析, 我们设想这种  $L$ - $I$  特性曲线扭转的 DH 激光器出现自脉动振荡, 是由于两个电光延迟时间不同的光丝激励而形成的, 因此我们试图用瞬态光谱测试或近场分布测试的方法, 对两光丝进行区分, 并给予分析研究。

我们对 34-8, 93-3, 40-6, 92-1 及 50 等样品进行了时间分辨光谱和分光谱瞬态响应的测试, 得出了一系列有共同变化规律的结果。我们还进行了时间分辨的近场分布的测试, 也同样得出了有意义的结果。

下面主要以 93-3 样品为例进行讨论, 它的  $L$ - $I$  特性曲线如图 1 所示。测试结果如图 3, 4, 5, 6 所示, 从实验结果可得出:

(1) 激光输出是由两簇发射光谱组成, 即可看作是由两个光丝组成, 我们称之为光丝  $L_1$  和光丝  $L_2$ 。两光丝的中心峰值波长差在几十埃的量级上, 最大的可达  $70 \text{ \AA}$  左右, 93-3 样品的波长差约为  $40 \text{ \AA}$ 。

(2) 光丝  $L_1$  的波长较长, 即发射光子能量较小, 并且激光延迟时间较短, 即先激励。光丝  $L_2$  的波长较短, 即发射光子能量较高, 并且激光延迟时间较长, 即后激励。

(3) 自脉动振荡现象是发生在注入脉冲电流幅度加到  $L$ - $I$  特性曲线第二个转折点

以后, 即  $L-I$  特性曲线重新再开始上升的区域。这正好是光丝  $L_2$  的激射所致。相应的光丝  $L_1$  的光输出也有小的变化。

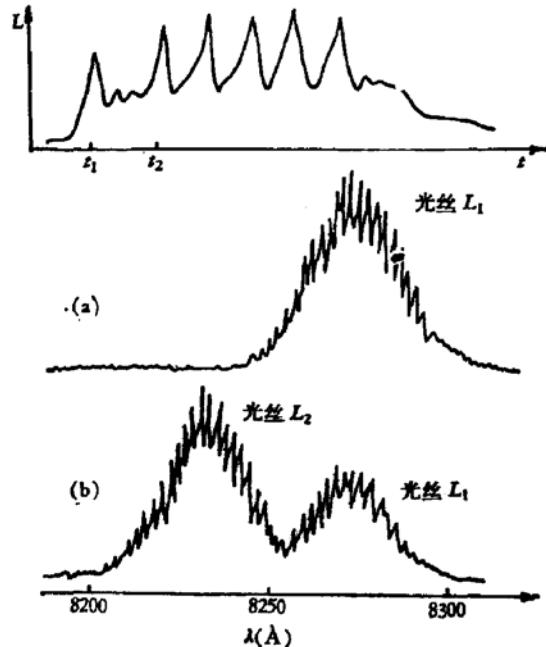


图 3 93-3 DH 激光器的时间分辨光谱  
(a)  $t_1$  时刻光谱 (b)  $t_2$  时刻  
光谱 ( $I_p = 186\text{mA}$ )

(4) 自脉动振荡的重复频率与注入脉冲电流的幅度有关, 随着注入脉冲电流增大, 重复频率增高, 并且光丝  $L_2$  的激光延迟时间也随注入脉冲电流的增大, 有明显的变短。

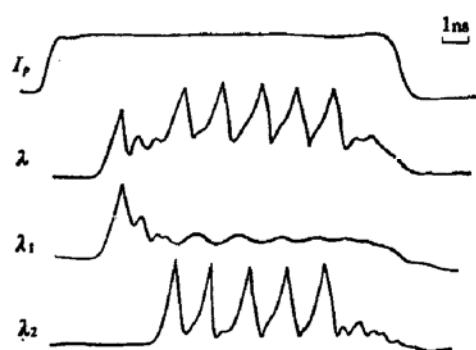


图 4 93-3DH 激光器在不同波长范围的光输出瞬态响应  
 $I_p = 186\text{mA}$   $\lambda(8200-8300\text{\AA})$   $\lambda_i(8264-8276\text{\AA})$   
 $\lambda_2(8234-8246\text{\AA})$

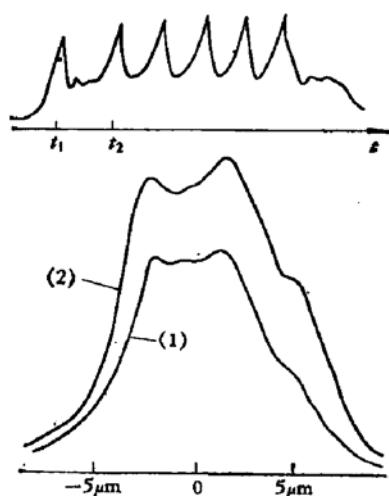


图 5 93-3 DH 激光器瞬态近场分布  
(1) 对应  $t_1$  时刻 (2) 对应  $t_2$  时刻

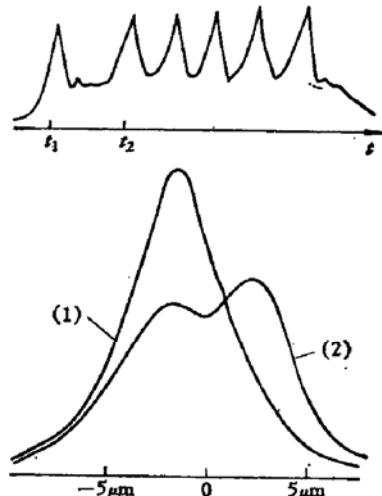


图 6 34-8 DH 激光器瞬态近场分布  
(1) 对应  $t_1$  时刻 (2) 对应  $t_2$  时刻

(5) 不同样品的瞬态近场分布不同。从 93-3 样品看, 两个光丝沿条形方向上串联成份较多, 而 34-8 样品两光丝并联的成份较多。

#### 四、讨 论

根据时间分辨光谱的测量结果可以看出,  $L-I$  特性曲线扭折的 DH 激光器具有相隔

几十埃的不同波长的两个光丝。我们认为这可能是由于 DH 激光器有源区中 Al 含量不均匀所造成的。从同一外延片制做的激光器的波长比较来看，彼此相差最大值可达 73 Å<sup>[5]</sup>，即有源区中 Al 含量的变化范围在 0.01 以内。如果在同一 DH 激光器有源区中 Al 含量不均匀，就可能形成禁带宽度不同的两个或两个以上的相邻的激光二极管。从瞬态近场分布测试结果分析，在与注入电流方向垂直的平面上，即有源区的平面上，存在有两个发光区域。这两个区域发射的光丝正对应于两个激光二极管。可以设想，这两个二极管在注入电流方向上是并联的。在这基础上，我们可以利用不同发射波长的双光丝的双二极管模型，如图 7 所示。对 DH 激光器的自脉动振荡的产生过程进行定性的分析。 $E_{F1}$  表示光丝  $L_1$  填充电子密度  $n_{th1}$  时的阈值准费米能级位置，此刻在光丝  $L_2$  中相应电子浓度为  $n'_2$ ，准费米能级位置为  $E'_{F2}(n'_{th2})$ ， $n_{th2}$  则表示  $L_2$  光丝的阈值填充电子浓度，其相应准费米能级为  $E_{F2}$ 。图 8 是根据我们的实验结果而画出的自脉动振荡过程示意图。根据图 8 分别讨论光丝  $L_2$  的激光延迟特性，脉动重复频率与注入电流的关系，以及产生自脉动的必要条件。

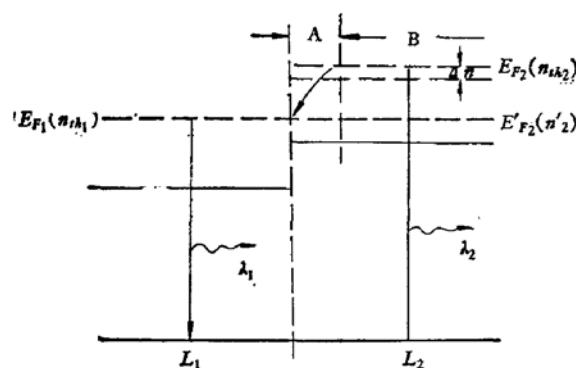


图 7 不同发射波长的双光丝模型

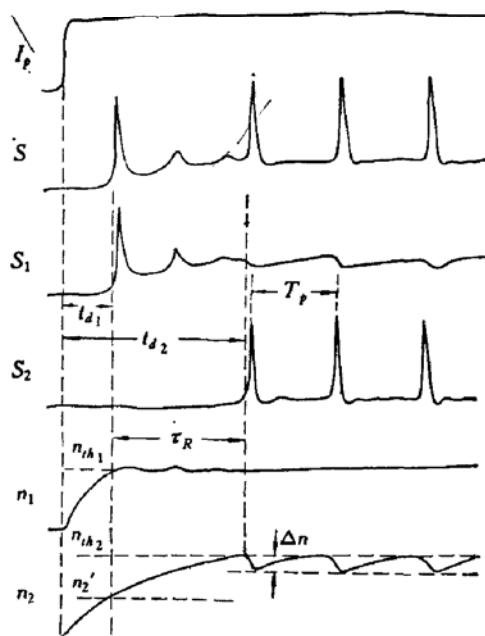


图 8 DH 激光器自脉动振荡过程示意图

### (1) 光丝 $L_2$ 的激光延迟特性

根据图 8 所示意的自脉动过程，我们对激光延迟时间进行估计。当幅度超过  $L-I$  曲线的第二个转折点的脉冲电流注入 DH 激光器后，即注入电流密度都达到或超过光丝  $L_1$ 、 $L_2$  的激射阈值。根据实验结果， $L_2$  的禁带宽度比  $L_1$  要大些，经过激光延迟时间  $t_{d1}$  后，光丝  $L_1$  先达到阈值而激射，以后光丝  $L_1$  的准费米能级  $E_{F1}$  将不提高了，而由于光丝  $L_2$  尚未达到激射阈值，故注入光丝  $L_2$  中的载流子使其准费米能级继续提高，经过延迟时间  $t_{d2}$  后，光丝  $L_2$  开始激射，显然从正常激光延迟看，有  $t_{d2} > t_{d1}$ 。

由于  $L_2$  与  $L_1$  的激射准费米能级不同，在  $L_2$  和  $L_1$  之间存在电势差，使注入到  $L_2$  的载流子中靠近  $L_2$  和  $L_1$  交界处的一部分，会被扫到  $L_1$  中复合掉，这样更加长了  $L_2$  的激光延迟时间。它与两光丝的准费米能级差值有关系。

## (2) 自脉动重复频率与注入电流的关系

光丝  $L_2$  的自脉动振荡是开关式的，脉冲宽度比脉冲间隔小得多，如图 8 所示。其重复频率由  $f = 1/T_P$  来决定， $T_P$  是补充由于产生光脉冲而减少的载流子密度  $\Delta n$  所需要的时间。在两脉冲之间，光丝  $L_2$  可认为没有激射，故有  $S_2 = 0$ ，则可得到：

$$\begin{aligned} T_P &= \int_{n_{th_2}-\Delta n}^{n_{th_2}} \frac{dn}{J_2 - \frac{n}{\tau_{SP_2}}} \\ &= \tau_{SP_2} \ln \left[ 1 + \frac{\frac{\Delta n e_d}{\tau_{SP_2}}}{J_2 - \frac{n_{th_2} e_d}{\tau_{SP_2}}} \right]. \end{aligned}$$

令  $I = AJ = \frac{n e d A}{\tau_{SP}}$ ， $A$  为有源区面积，

$$\begin{aligned} \text{则 } T_P &= \tau_{SP_2} \ln \left[ 1 + \frac{\Delta I}{I_2 - I_{th_2}} \right], \\ &= \tau_{SP_2} \ln \left[ 1 + \frac{\Delta I}{I_{th_2}} \frac{I_{th_2}}{I - I_{th_2}} \right]. \end{aligned}$$

当  $\frac{\Delta I}{I_{th_2}} \frac{I_{th_2}}{I - I_{th_2}} \ll 1$ ，即  $\frac{\Delta I}{I_{th_2}} \rightarrow 0$  时，

$$\text{可求出 } f = \frac{I_{th_2}}{\tau_{SP_2} \Delta I} \frac{I_2 - I_{th_2}}{I_{th_2}}.$$

根据此式，如果假设载流子密度涨落为百分之一时，即  $\Delta n/n_{th_2} = \Delta I/I_{th_2} = 0.01$  时，并且  $\tau_{SP_2} = 2.5 \text{ ns}$ ，当注入电流  $(I_2 - I_{th_2})/I_{th_2}$  的变化在 0.005 到 0.05 范围内，自脉动重复频率  $f$  就在 200MHz 到 2GHz 的范围内。这与我们实验观察到的自脉动重复频率的变化范围基本一致。

## (3) 自脉动振荡的必要条件

DH 激光器的有源区是长约  $200 \mu\text{m}$ ，宽约  $12 \mu\text{m}$  的条形结构，Al 含量不均匀的几率在腔长方向上大些，因此可假设两个激光二极管在光传播方向是串联的，如图 9 所示。这

里我们提出一种产生自脉动的可能机理。由于  $L_1$  和  $L_2$  的禁带宽度不同，先激射的  $L_1$  的禁带宽度比  $L_2$  小，注入到  $L_2$  中的电子在与  $L_1$  交界处附近一定空间范围（如图 9 中 A 区域）内，将被扫到  $L_1$  中复合，使注入在  $L_2$  中载流子的分布不均匀，因而  $L_2$  中增益沿光传播方

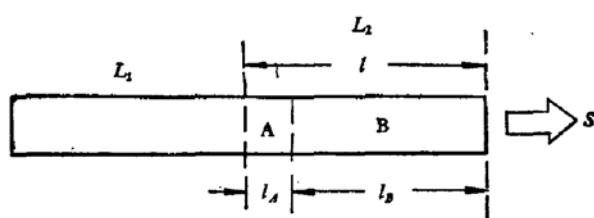


图 9 有源区中光丝  $L_1$ 、 $L_2$  串联示意图

向的分布是不均匀的，甚至当  $L_2$  达到激射阈值情况下， $L_2$  中的 A 区域仍为损耗区域，即 A 区为损耗区，B 区为增益区。类似于 R. W. Dixon 等提出的耗尽区吸收的机理<sup>[6]</sup>，产生

自脉动的关键条件, 是增益  $g(n)$  函数要有充分的非线性。GaAs 的  $g(n)$  函数曲线已由 F. stern 计算求出<sup>[7]</sup>。

当光丝  $L_2$  达到了阈值条件后开始激射, B 区的增益减少了  $\Delta g$ , A 区由于光泵浦的结果, 使得载流子密度增大, 故损耗减少了  $\Delta\alpha$ , 按 R. W. Dixon 等给出的产生不稳定激射的必要条件:

$$l_A |\Delta\alpha| > l_B |\Delta\beta|.$$

即 A 区中的吸收损耗的减少比 B 区中增益的减少要大, 在这条件下, 净维持增益大于稳态激射需要的增益, 光丝  $L_2$  就产生光激励脉冲。光子在腔内的积累, 使 B 区载流子过量复合, 载流子密度减少。而 A 区中, 由于光泵浦, 使载流子密度有所增加, 由于  $g(n)$  函数的非线性, 使平均增益减少到低于稳态激射的增益, 光丝  $L_2$  停止激射, 于是就完成了自脉动振荡的一个光脉冲, 经过  $T_p$  时间的注入电流后, 使之再次达到激射阈值条件时, 下一个光脉冲又开始了, 重复下去, 就形成了自脉动振荡的光脉冲群。

在光丝  $L_2$  产生自脉动振荡期间, 光丝  $L_1$  是处在稳定激射状态, A 区中的部分载流子一迁移到  $L_1$  中, 就会被很快地受激复合掉了, 因此对  $\lambda_2$  波长的激光而言, A 区是损耗区。光丝  $L_1$ ,  $L_2$  的波长差较大时, 在 A 区中的损耗也就增大, 所以对于  $L-I$  特性曲线出现平台区扭折的 DH 激光器, 很容易满足不稳定激射条件, 从而产生自脉动振荡现象。

感谢王守武教授的指导, 以及北京大学郭长元副教授在审阅本文时提出宝贵的修改意见。感谢本所七室双异质结激光器研制所提供的大量的测试样品, 以及理化分析室、六室等单位提供测试仪器。在具体工作中还特别感谢张敬明、徐俊英、马英棣等同志的大力协同。

### 参 考 文 献

- [1] G. Arnold, K. Petermann, *Optical and Quantum Electronics*, 10, 311 (1978).
- [2] 王启明, 庄婉如, 杨培生, 通信学报, 2, 45 (1981).
- [3] K. Kobayashi, *Appl. Phys. Lett.*, 19, 323 (1971).
- [4] K. Kobayashi, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-9, 449 (1973).
- [5] 中国科学院半导体研究所七室, 长寿命  $Al_xG_{1-x}As/GaAs$  双异质结激光器研制报告, 1980, 11.
- [6] R. W. Dixon, W. B. Joyce, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-15, 470 (1979).
- [7] F. Stern, *J. Appl. Phys.*, 47, 5382 (1976).

## Self-sustained Pulsation Characteristics of GaAlAs/GaAs DH Lasers

Zhao Liqing and Wang Chiming

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

Chang Cunshan and Wu Zhenqiu

(Hebei University)

### Abstract

The measurements of the time resolution spectra and of the transient near field distribution have been carried out for the self-sustained pulsating oscillation behaviour in the optical output of GaAlAs/GaAs DH Lasers with "Kink"  $L$ - $I$  curves. According to the experimental results, the phenomenon of self-sustained pulsation has been quantitatively explained by a model having double filament with different wavelength caused by the non-uniform distribution of Aluminium in the active layer of the laser.