

GaAs-Al_{0.3}Ga_{0.7}As DH 激光器近场光谱的研究

张敬明 郑宝真

(中国科学院半导体研究所)

1981年1月20日收到

提 要

本文从近场光谱、分谱近场分布、分谱 L-I 特性和分区 L-I 特性等实验证明有源区 Al 不均匀引起 L-I 特性的非线性扭折和光谱的多组纵模，并且解释了实验观察到的模式竞争和光脉动等现象。

一、引言

近几年来，GaAs-Al_xGa_{1-x}As DH 激光器输出特性的非线性受到许多作者^[1-4]的重视。在我们研制的部份 DH 激光器中，L-I 特性也出现各种不同程度的非线性扭折。在这些器件中，可以观察到近场分布有多个峰和光谱特性随电流增加出现多组纵模^[5]。这种近场的多峰和光谱的多组纵模是有源区均匀激励产生高阶横模，还是有源区不均匀而产生丝状激射，这对某些激光器往往是模糊不清而不易区分的。过去已用有源区铝不均匀形成不同禁带宽度的二极管并联解释实验结果^[5]。为了进一步证实这种假设，搞清光谱和近场分布的关系，以及与扭折的联系，我们进行了分谱近场分布和分区光谱特性的测量，并且还测量了激光器总光谱特性随电流的变化和分谱 L-I 特性，以及近场分布随电流的变化和分区 L-I 特性。

本文从近场光谱的实验证明：近场的多峰和光谱的多组纵模是由于有源区铝分布不均匀引起，并造成 L-I 特性的非线性扭折。文章对实验中观察到的光脉动和模式竞争等现象也进行了讨论。

二、实验

被测样品为 GaAs-Al_{0.3}Ga_{0.7}As DH 激光器，具有通常的四层结构，用液相外延一次生长而成，有源层掺 Si，载流子浓度 $p_0 \approx 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ，厚度 $d \approx 0.3 \mu\text{m}$ 。用质子轰击形成条形激光器，质子能量 300—400 keV，剂量 $1-3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ ，深度 3—4 μm ，超过了有源层。激光器条宽 $\sim 15 \mu\text{m}$ ，腔长 $\sim 300 \mu\text{m}$ 。选择具有典型扭折的三只器件 34-7#、34-8#、34-9# 进行了测量，都发现有类似的结果。为了更好地说明这些结果之间的关系，以下只取一个样

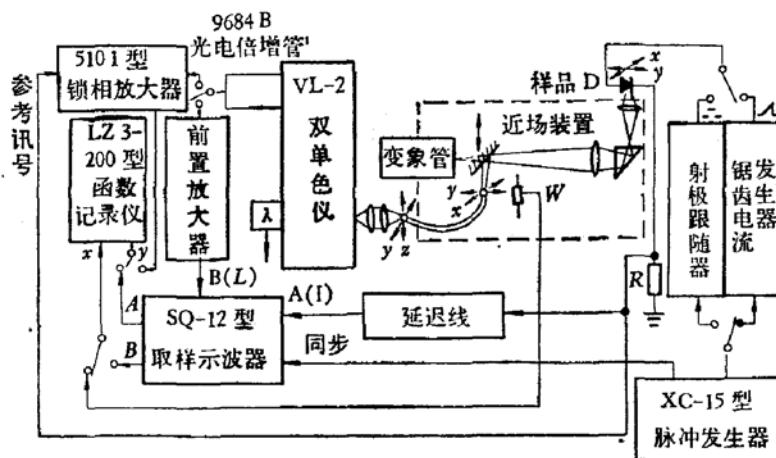


图 1 实验装置
(图中 λ 和 W 分别为波长和近场扫描电位器)

品进行讨论。

图 1 表示实验装置方框图。近场装置光学系统放大倍数为 200 倍, 分辨本领为 $1\mu\text{m}$ 。VL-2 为棱镜光栅双单色仪, 分辨率 $< 1\text{\AA}$ 。分别对近场分布和光谱测量时, 使用时间分辨测量技术^[6], 驱动的锯齿电流底宽为 500ns, 重复频率 $f = 1\text{kC}$, 这使测量 $L-I$ 特性方便, 同时可以消除加热效应。用它测量了近场分布和光谱特性随电流的变化, 以及平行结方向上的分区 $L-I$ 特性和激光器的分谱 $L-I$ 特性。近场光谱的测量是用 5101 型锁相放大器, 在重复频率 $f = 10\text{kC}$, 脉宽 $5\mu\text{s}$ 的矩形电流脉冲驱动下, 测量了近场光谱和分谱近场分布随电流的变化。

所有的测量在 300K 下进行。激光器原始的 $L-I$ 特性表示在图 2 中, 两条曲线分别在直流和锯齿脉冲下得到。实验对垂直结平面近场分布测量中, 在我们测试的电流范围内, 仅只有一个峰。

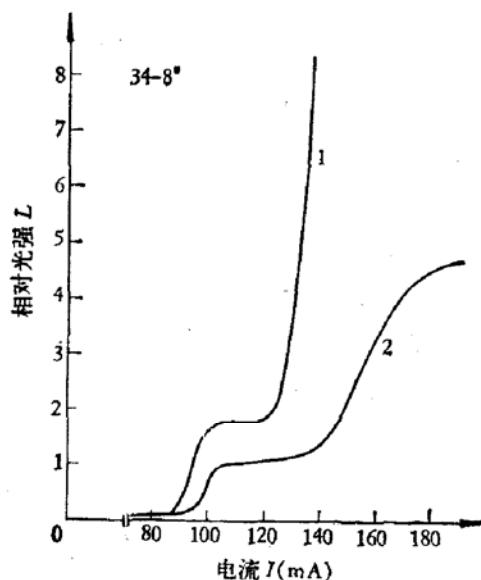


图 2 激光器的 $L-I$ 特性

1. 用锯齿脉冲测量, $f = 1\text{kC}$, $\tau = 500\text{ns}$
2. 直流测量

三、实验结果

1. 近场分布和分区 $L-I$ 特性

图 3 表示近场分布随电流的变化。当电流较小时, 仅有一个 A 峰, 位置偏离中心。随着注入电流增加, A 峰强度增加, 并且又长出了 B 峰。随电流增加 A、B 两峰的位置发生移动, 并且相互离开。这和 K. Kobayashi 等人的实验结果相似^[3]。在 160mA 时, 两峰相隔 $6\mu\text{m}$ 。

为了更仔细地观察两峰位置上光强随电流的变化,在A、B位置上分别测量L-I特性,称做分区L-I特性,表示在图4中。A发光区阈值 $I_{thA} = 88\text{mA}$ 。由于光场的耦合,A区的激射,引起B区的光强也有一个增加。A区光强经一段线性增长后,增长速率变小。在 $I_{thB} \approx 120\text{mA}$ 时,B区才发生激射,接着在稍大于 I_{thB} 的电流下,A区的光强再次迅速增加。在电流为140—158 mA的范围内发生强烈的光振荡。从我们的另一个测量中观察到这种光振荡可以持续 $\sim 2\mu\text{s}$ 。根据瞬态特性的测量,确定是一种光脉动现象。在 $I > 160\text{mA}$ 时两发光区出现较高的微分量子效率。

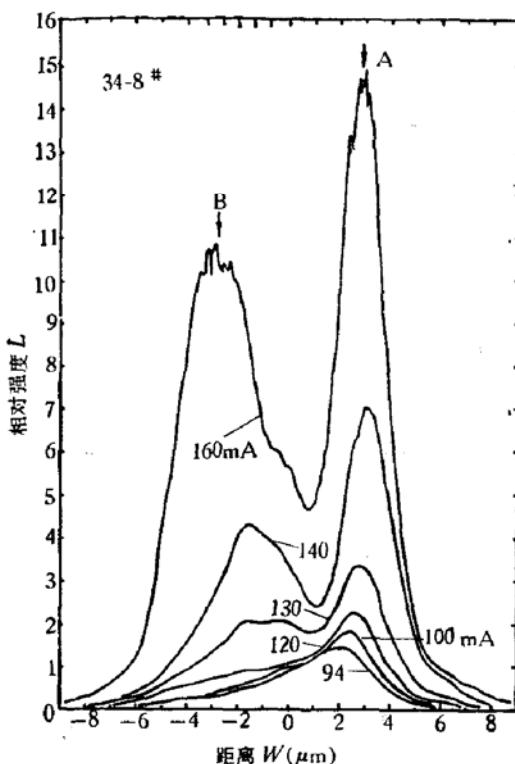


图3 不同注入电流下的近场分布

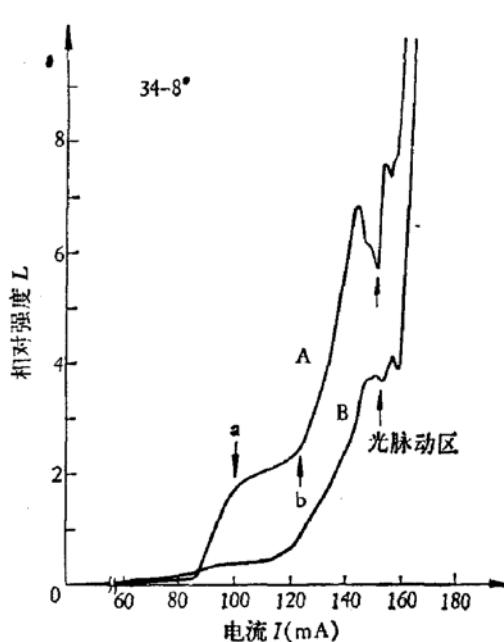


图4 A、B两区的分区L-I特性

2. 光谱特性和分谱L-I特性

图5表示不同注入电流的光谱分布。在刚超过激射阈值时,首先激发 $\lambda_L = 8575\text{\AA}$ 的纵模组。随着电流增加该波长光强增加,以后又激发了较短波长的模组,并且几组纵模发生竞争。在120mA时光谱较宽,而且强度都比较弱。

为了更清楚地看出几组纵模的相互竞争,对几组纵模的波长测量了分谱L-I特性,表示在图6中。 $\lambda_L = 8575\text{\AA}$ 的纵模组,在 $\sim 95\text{mA}$ 处强度发生极大,电流再增大,光强反而减小。直到 $I \approx 158\text{mA}$ 时光强又急剧增大。其它两个纵模组的波长上也有类似的情形。如图5一样在 $I = 120\text{mA}$ 左右各波长光强都较弱,在8515—8595 \AA 的波长范围内都接近激射阈值。这与图2的L-I特性的平台区相对应。它正酝酿着几组模的更强的激射和相互竞争。从图6看出几组纵模有不同的阈值电流。

3. 分谱近场分布和分区光谱特性

图7表示电流为120mA和160mA下测量的分谱近场分布。在 $I = 120\text{mA}$ 仅A发光

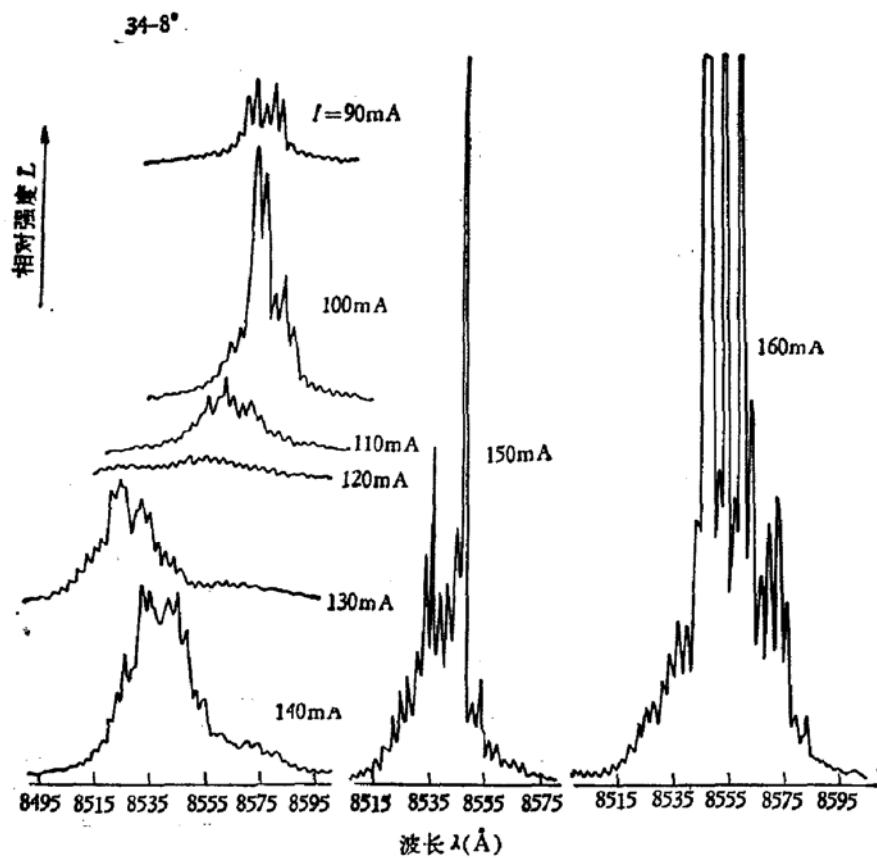
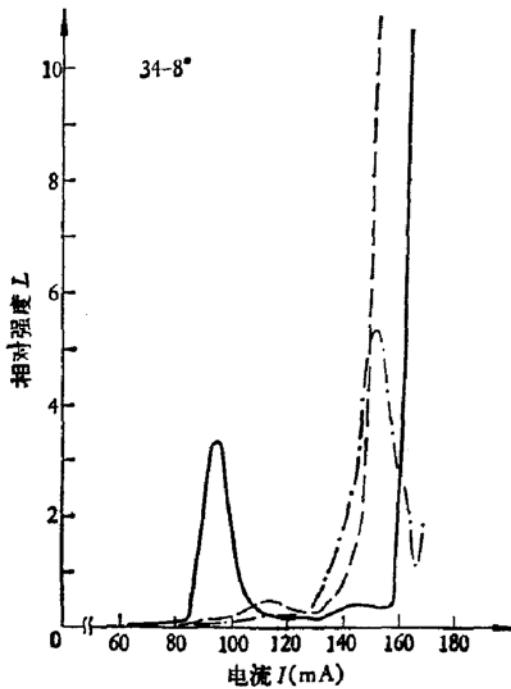
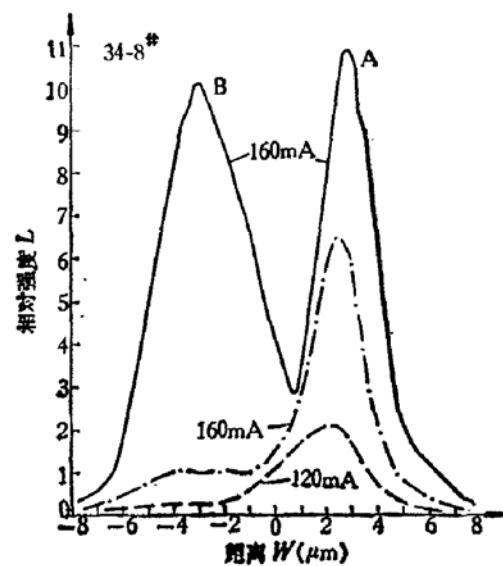


图 5 不同注入电流的光谱特性

图 6 分谱 L - I 特性
---8535 Å, ——8548 Å, -·-8575 Å图 7 分谱近场分布
——8550 Å, -·-8590 Å

区发射峰值为 8590 Å 的纵模组。在 $I = 160 \text{ mA}$, A 发光区发射峰值为 8590 Å 和 8550 Å 的纵模组, 而 B 发光区仅产生发射峰值为 8550 Å 的纵模组。分别对 A、B 两区测量的分

区光谱分布表示在图 8 中, 图中还表示了两发光区光谱随注入电流的变化。可以看出: A 发光区在电流较小时仅发射峰值为 8590 Å 的纵模组, 当电流加大后又出现峰值为 8550 Å 的纵模组。而在 B 发光区中没有峰值为 8590 Å 的纵模组。

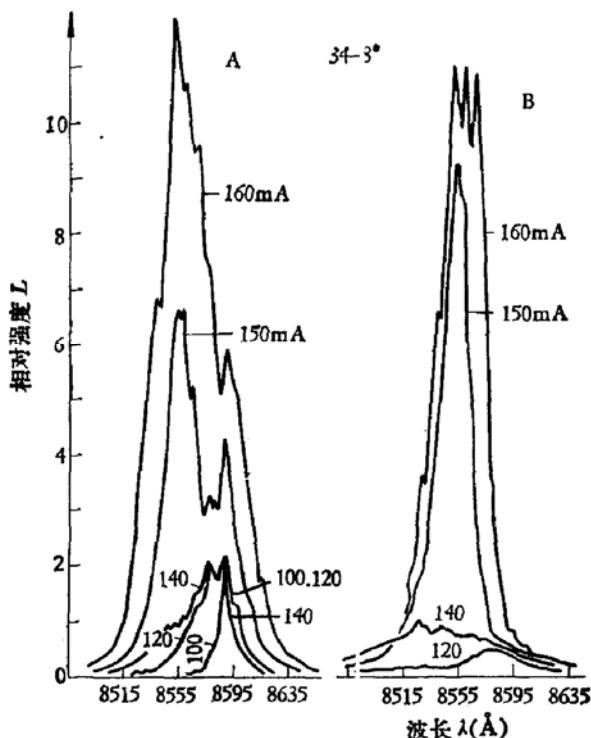


图 8 A、B 两个分区的光谱分布

四、分析和讨论

从图 3 中 A、B 两发光区(以后称发光丝)分别在不同的电流下先后产生和图 7 的两发光丝含有不同的光谱成份, 并且在实验中我们观测到垂直结的近场分布只有一个峰, 这说明: 光谱的多组纵模不是激发了垂直结平面的高阶横模, 近场的双峰也不是激发了平行结平面的高阶侧模, 而是由于有源区 Al 分布不均匀引起。在多层液相外延中, 生长 N-Al_{0.5}Ga_{0.5}As 的溶液随着衬底携带到生长有源层的溶液中, 造成生长的有源层的铝在平行结平面上分布不均匀。Al_xGa_{1-x}As 三元固溶体 Γ 带的禁带宽度与 x 值的关系, 在 300K 可写作^[7]:

$$E_g^I = 1.439 + 1.042x + 0.468x^2. \quad (\text{eV}) \quad (1)$$

x 值的变化引起 E_g^I 的变化可由 (1) 式微分得到,

$$dE_g^I = (1.042 + 0.936x)dx. \quad (2)$$

激光器光谱波长为 λ_1 和 λ_2 的两种光子能量之差为

$$\Delta E = \frac{hc}{\lambda^2} \Delta \lambda. \quad (3)$$

其中 $\lambda^2 = \lambda_1 \cdot \lambda_2$, $\Delta \lambda = |\lambda_2 - \lambda_1|$ 。假定多组纵模的峰值波长完全由铝组分 x 值的不同引起, 则由 (2) 和 (3) 式可以得到有源区 Al 组分不均匀为

$$\Delta x = \frac{hc\Delta\lambda}{(1.042 + 0.936x)\lambda^2} \quad (4)$$

根据图 5 中 $I = 150\text{mA}$ 的光谱, 邻近二纵横组间隔 $\Delta\lambda \approx 11\text{\AA}$ 和最远二纵横组间隔 $\Delta\lambda \approx 48\text{\AA}$, 由(4)式估计它们对应的有源区铝的不均匀分别为 $\Delta x \approx 1.67 \times 10^{-3}$ 和 $\Delta x \approx 7.28 \times 10^{-3}$. 其中 $\lambda = 8555\text{\AA}$ 对应 $x = 0.08$.

如果我们把一个均匀的条形激光器纵向分成两个部份, 显然激光器的增益等于两部分材料的增益之和. 现在假定两部份材料铝组分相差 Δx , 增益分别为 $g_1(h\nu)$ 和 $g_2(h\nu)$, 它们又分别随其电子浓度变化, 总增益为 $g(h\nu) = \frac{L_1g_1(h\nu) + L_2g_2(h\nu)}{L_1 + L_2}$, 其中 L_1 和 L_2 分别为两种材料的长度. 由于两部分材料禁带宽差 ΔE_g , 在相同的激发电平下, $g_1(h\nu)$ 和 $g_2(h\nu)$ 的极大值差即为 ΔE_g , 总增益极大值有二个峰, 间隔 $\Delta h\nu$. 这样能量间隔 $\Delta h\nu = \Delta E_g$ 的两纵横组将先后产生激射. 如果纵向存在几种铝组分其增益表示为:

$$g(h\nu) = \frac{\sum_i L_i g_i(h\nu)}{\sum_i L_i} \quad (5)$$

其中 i 表示几个部分, L_i 表示对应 $g_i(h\nu)$ 材料的长度, 第 i 部分材料的增益为

$$g_i(h\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} g_i(x \cdot h\nu) |E_v(x)|^2 dx / \int_{-\infty}^{\infty} |E_v(x)|^2 dx \quad (6)$$

对于两种铝含量的情况, 我们把铝含量低的区集中称 D_1 二极管, 它禁带窄电流先导通, 发射较长波的光. 把铝量较高的区集中称 D_2 二极管, 它禁带较宽电流后导通, 发射较短波长的光. 现在我们来看图 7 和 8, 在 A 丝中存在 D_1 和 D_2 二个二极管, 在光路上是串联的, 而 B 丝只存在 D_2 二极管. 图 7 中 $I = 120\text{mA}$ 时仅 D_1 增益谱极大处激射, 发射峰值波长为 8590\AA 的纵横组. $I = 160\text{mA}$ 时, D_1 和 D_2 二增益谱极大的光子能量上都激射, 发射峰值为 8590\AA 和 8550\AA 的纵横组. 所以 A 丝包含峰值为 8590\AA 和 8550\AA 的纵横组, 而 B 丝仅发射峰值为 8550\AA 的纵横组.

在图 4 中, 随着电流增加, 当 A 丝达到 $\lambda_L = 8575\text{\AA}$ 的纵横组激射时, 电子准费米能级定位, A 丝光强迅速增加. 当 $I \approx 95\text{mA}$ 时, 由于流过有源区两种铝组分材料上的电流分配发生变化. D_2 的电流开始增加, 自发发射由饱和转变成不饱和, A 丝 $L-I$ 特性斜率减小, 对应于 a 类扭折. 当电流增加到 $\lambda_L = 8535\text{\AA}$ 的纵横组激射时, 电子准费米能级再一次定位, 自发发射由不饱和转变成饱和, 对应于 b 类扭折, A、B 两光丝的光强又迅速增加. 由于有源区铝含量不均匀, 使增加的注入电流有时用于发射激光, 有时用于增加自发发射, 所以使光输出特性产生扭折.

由于 A、B 两光丝在同一波导层中间隔 $\sim 6\mu\text{m}$, 光场相互耦合, A 光丝光强增加引起 B 光丝阈值降低光强增加, B 光丝光强增加引起 A 光丝阈值降低光强增加, 这种正反馈使两光丝光强剧烈增加, 阈值降低, 而导带电子急剧减少, 当电子减少到不能维持光强增加时, 光强开始下降, 然而电子仍然大量复合, 电子浓度不断降低, 当电子浓度降低到不能维持激射阈值时, 光强降低到最小, 然后注入电子又向导带填充, 这样周而复始造成强烈的光脉动, 由于光强达一定值时正反馈才能满足振荡条件, 所以图 4 中振荡发生在有足够的光

强的 $I = 140\text{--}158\text{mA}$ 的区域。

由于几种不同 Al 量部分的增益随其电子浓度变化, 它们的电子浓度随注入电流密度变化。当注入电流增加时, 电流分配比发生变化, 因而产生图 6 表示的几组不同峰值波长的纵模组的相互竞争。图 6 中 120mA 左右的电流时, 几个波长的光强都比较弱, 这和图 5 120mA 的光谱结果相同, 这是由于激发了较高光子能量的自发发射, 原来发射激光的那部份能量也转移到增加高能的自发发射, 使增益谱加宽的缘故。

从我们的实验结果和分析讨论证明: 有源区铝分布的不均匀、造成了光谱的多纵模和纵模组的模式竞争, 近场的多峰, 以及光输出特性的扭转等现象。为了获得好的光谱特性, 近场分布和改善光输出的线性, 应该尽量提高有源区铝分布的均匀性, 另外尽量采用窄条短腔结构来消除这种不均匀的影响。

本工作是在王启明同志的指导下进行的。实验中徐俊英同志给予了大力协助, 样品是由本室双异质结激光器研制组提供的。

参 考 文 献

- [1] T. L. Paoli, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, QE-12, 770(1976).
- [2] M. D. Campos et al., *IEEE Journal of Quantum Electronics*, QE-13, 687(1977).
- [3] K. Kobayashi et al., *Jpn. J. A. P.*, 16, 207(1977).
- [4] G. H. B. Thompson et al., *Solid-State and Electronic Devices*, 2, 12(1978).
- [5] 光电研究室, 半导体学报, 1, 47(1980).
- [6] 王仲明、张敬明, 物理, 4, 326(1975).
- [7] A. Onton, M. P. Lorenz & J. M. Woodall, *Bull. Am. Phys. Soc.*, 16, 371(1971).

Study of Near Field Spectrum of GaAs-Al_{0.3}Ga_{0.7}As DH Lasers

Zhang Jingming and Zaeng Baozhen

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

Abstract

Investigations have been made on near field spectrum, near-field intensity distribution at different wavelength, L - I characteristics of different wavelengths and of different spatial positions. The results show that the kinks behaviour of L - I curve and multiple groups of longitudinal mode are attributed to non-uniform distribution of Al composition in the active area. Explanations of mode-competition and light pulsation observed are given.