

非对称波导 GaAlAs/GaAs 快速边发光管的几何结构及性能

逄永秀 王德宁 龚连根 吴冠群 潘慧珍
(中国科学院上海冶金研究所)

吴陈周
(邮电部上海通信设备厂)
1985年11月19日收到

本文阐述了条形几何结构对非对称波导 GaAlAs/GaAs 快速边发光管性能的影响,计算了五层非对称波导边发光管的输出功率和光抽取效率及它们与结构参数之间的关系,还计算了不同条宽的侧向电流分布和光场分布情况。计算与实验结果很好相符。通过合理的选择,在 100 mA 的注入电流下获得了性能良好的发光二极管,其标准尾纤的输出功率 $\geq 60 \mu\text{W}$ (最高达 $220 \mu\text{W}$), 3 dB 的截止频率 $f_c \geq 60 \text{ MHz}$ (最高 100 MHz)。是三次群光通信和其他快速模拟传输系统较为理想的光源器件。

一、引言

作为光纤通信系统的光源,虽然激光管有许多优于发光管的长处,但就其寿命和成本而言都远不及 LED,又因后者驱动电路简单,容易更换,因此在中短距离通信中,LED 仍可获得广泛的应用,特别是快速边发光管在 $20 \sim 100 \text{ Mb/S}$ 的传输速率下更显示出明显的优点^[1]。在 1983 年我们报道了具有输出波导结构的 $30 \mu\text{m}$ 条形接触的边发光管^[2]。为了改进 LED 的耦合输出,本文就其结构设计,外延生长和器件的工艺制备又作了很大改进。

现代光纤通信系统对发光管的主要要求:光功率要大(光抽取效率高)、近场好、远场发散角小、带宽大、响应快、线性好、温度特性好、稳定可靠寿命长。这些技术参数的满足与 LED 结构的设计很有关系,即与外延材料的内部结构和器件工作区的外部几何结构有关。本文着重阐明 LED 的外部结构对 GaAlAs/GaAs 发光管各种性能的影响。我们研制的侧面出光的 GaAlAs/GaAs 快速边发光管,它的主要几何结构特征是以接触电极的条宽 S ,腔长 L 和 $d_g = \frac{d_2}{d_3}$ (d_2 : 波导层厚度, d_3 : 有源层厚度) 为表征的。在最佳 d_g 下改变条宽和腔长,从而研究了电流-功率关系、光提取效率、频响特性、近场和远场特性及耦合效率等。还计算了输出功率和光提取效率,探讨了 LED 的纵向发光特性以及不同条宽下侧向电流分布的计算,获得与实验相符的结果。

二、LED 的结构和计算的基础

1. 零件的结构

LED 结构示意图见图 1, 在 n-GaAs 衬底上依次生长 n-Ga_{1-x}Al_xAs 限制层, n-Ga_{1-y}Al_yAs 波导层, p-Ga_{1-z}Al_zAs 有源层, p-Ga_{1-x}Al_xAs 限制层和 n-GaAs 反偏结隔离层。各层厚度与有源层厚度比值用 d_s 表示。

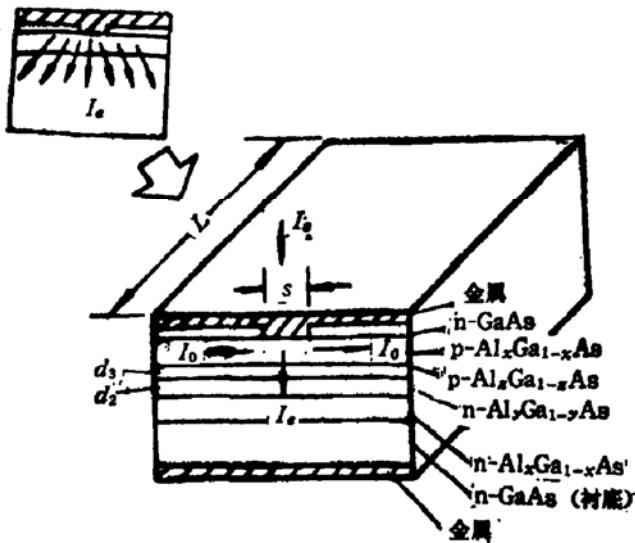


图 1 LED 结构示意图

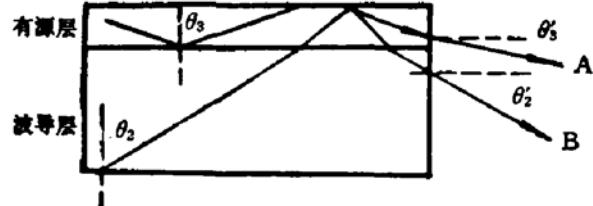


图 2 LED 的光传输模式

输出有 A 和 B 两种模式^[3]。光的提取效率为 $\eta_e = \frac{P_e}{P_g}$, (1)

$$\text{其中 } P_c = P_A + P_B, \quad (2)$$

式中 P_e : 由一解理端面发射出的光功率 P_g : 有源层内产生的总功率; P_A 、 P_B 分别是 A、B 模式的输出功率。

在有源区内任何一点光的发射是各向同性的，定义在某点每单位体积发射的光功率为 $P(x, y, z)$ ， P 是光生密度。由此可见， $P_g = d_3 SLP$ 。 (3)

应用文献[4]，考虑非对称波导结构，加以修改后可得：

$$P_A = D \left\{ \int_a^b \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi \sin \theta d\theta}{4\pi} \times \frac{1}{A_3} \times u(\gamma_3) [(1 - e^{-A_3 L}) (1 - R_3) / (1 - R_3^2 e^{-2A_3 L})] \right\} \right. \\ \left. + \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \frac{d\varphi \sin \theta d\theta}{4\pi} \times \frac{1}{A_3} \times u(\gamma_3) [(e^{-A_3 L} - e^{-2A_3 L}) \right. \\ \left. \times R_3 (1 - R_3) / (1 - R_3^2 e^{-2A_3 L})] \right\}. \quad (4)$$

式中 $D = 2d_3SP$, $a = \theta_3^{(1)}$, $b = \pi - \theta_3^{(1)}$. 若将上式中使 $D = 2d_3SP$, $a = \theta_3^{(2)}$, $b = \theta_3^{(1)}$, 且将 R_3 , A_3 , $u(r_3)$ 分别换成 R_s , A 及 u_s 即为 P_B 的表达式. 这里 $A_s = \frac{a_3}{\cos \varphi \sin \theta}$, 发射率 $R_3 = n_3^2$, a_3 为有源层吸收系数. 而 $A = \frac{\xi_3 a_3}{\sin \theta \sin \varphi} + \frac{\xi_2 a_2}{\sin \theta \cos \varphi}$, $\xi_3 = 2d_3 \tan \theta_3$, $\xi_2 = 2d_2 |\tan \theta|$, $l_r = 2d_2 \tan \theta_2 + 2d_3 |\tan \theta|$ 而 $R_s = (d_2 R_2 + d_3 R_3) / (d_2 + d_3)$, $R_2 \approx n_2^2$, $\theta_3^{(1)} = \sin^{-1}(n/n_3)$, $\theta_3^{(2)} = \sin^{-1}(n_4/n_3)$.

这里设定一定空间角度 γ_3 后, 当 $\theta'_3 \leqslant \gamma_3$ 时, $u(\gamma_3) = 1$, 当 $\theta'_3 > \gamma_3$ 时, $u(\gamma_3) = 0$, 而 $\theta'_3 = \sin \theta \cdot (\sqrt{n_1^2 - n_2^2} / n_0)$. $u_s = [d_2 u(\gamma_2) + d_3 u(\gamma_3)] / (d_2 + d_3)$, 对 $\theta'_3 > \gamma_3$ 时, $u(\gamma_2) = 0$, $\theta'_3 \leqslant \gamma_3$ 时 $u(\gamma_2) = 1$, 而 $\theta'_3 = n_3 / n_2 \cdot \sin \theta \sqrt{n_2^2 - n_1^2} / n_0$. 根据式(4), 应用 Gaussian 多重积分程序就可方便地计算出在一定空间角度 γ_3 下各种结构参数对 s_c 的影响.

3. 侧向电流, 光强分布

条形结构的 LED 中侧向电流的限制并不完善, 按 Yonezy^[3] 等人所用的方法, 可认为总电流 I_s 为条形电极下流过的电流 I_e 和沿水平方向流向两侧的分布电流 I_o 之和(见图 1)即

$$I_s = I_e + 2I_o. \quad (5)$$

这里 $I_e = J_e \cdot sL$, $I_o = J_e \cdot l_o L$.

式中 I_e 为条区下的注入电流, $l_o = \left(\frac{0.10339}{R_x I_e} \right)^{\frac{1}{2}}$, 式(5)可改写为

$$I_s = J_e s L + 2J_e^{\frac{1}{2}} \left(\frac{0.10339}{R_x} \right)^{\frac{1}{2}} L. \quad (6)$$

R_x 为水平方向的薄层电阻, 由实验测定的上限制层电阻率与厚度计算为 5000Ω .

有源层内部水平方向的注入载流子浓度分布由下式表达^[4]:

$$\begin{aligned} n(x) &= GL_s^{\frac{1}{2}} - GL_s^{\frac{1}{2}} \left(\frac{L_s}{l_o + L_s} \right) \exp \left(-\frac{s}{2L_s} \right) \cosh \left(\frac{x}{L_s} \right) \\ 0 \leqslant |x| &\leqslant \frac{1}{2}s \end{aligned} \quad (7-a)$$

及

$$\begin{aligned} n(x) &= GL_s^{\frac{1}{2}} \left(\frac{l_o}{l_o - L_s^{\frac{1}{2}}} \right) \exp \left(-\left| \frac{x - \frac{1}{2}s}{l_o} \right| \right) - \frac{1}{2} GL_s^{\frac{1}{2}} \left[\left(\frac{L_s}{l_o - L_s} \right) \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{L_s}{l_o + L_s} \right) \exp \left(-\frac{s}{2L_s} \right) \right] \exp \left(-\left| \frac{x - \frac{1}{2}s}{L_s} \right| \right). \\ \frac{1}{2}s \leqslant |x| &\leqslant \infty \end{aligned} \quad (7-b)$$

式中 $G = I_e / q D_s d_3$, q 为电子电荷, D_s 为电子扩散系数, d_3 为有源层厚度, L_s 为电子扩散长度. 按文献[6], 侧向光强分布函数可表达为:

$$B(x) = k n(x) [n(x) - n_{\infty}]. \quad (8)$$

这里 n_{∞} 为有源层中的平衡电子浓度, k 为比例系数, 归一化的侧向光强分布为:

$$\frac{B(x)}{B(0)} = \frac{n(x) [n(x) - n_{\infty}]}{n(0) [n(0) - n_{\infty}]} . \quad (9)$$

式中 $B(0)$ 为 $x = 0$ 时, 即条宽中心的峰值强度, 我们分别取 $D_s = 30 \text{ cm}^2/\text{s}$, $L_s = 3 \mu\text{m}$, $d_3 = 0.3 \mu\text{m}$, 则可从(7-a)获得一定条宽 s 的某注入电流 I_s 下的 $n(0)$, 那么, 当 $B(x_a) = \frac{1}{2} B(0)$ 时, 由式(9)得到 $n(x_a)$, 由式(7-b)用迭代法可得 x_a , 而半强度全宽 $W_{\frac{1}{2}} = 2x_a$,

用上述方法就可求得一定条宽 s 下的 I_s 与 $W_{\frac{1}{2}}$ 的关系, 改变 s 即可得出不同的 $I_s \sim W_{\frac{1}{2}}$ 关系。

三、实验和计算结果的讨论

因为大多数光通信系统都使用 $50 \mu\text{m}$ 芯径的低损耗标准光纤, 所以需要较小的条形几何结构以利把较多的光耦合入光纤。我们用相同外延片制作具有不同条宽($10-30 \mu\text{m}$)的一组边发光管样品取样测量, 获得如下结果。

1. 电流-功率(I-P)关系

对每一条宽我们任意取六个器件, 测量它们的功率输出随注入电流的变化。为便于比较将功率对条宽进行归一化。如图 3 所示。可见, 归一化的输出功率随条宽的降低而增加。这是由于注入电流密度的相应增加, 提高辐射复合密度的缘故。当条宽 $s \geq 20 \mu\text{m}$, $I-P$ 曲线可保持良好线性, 当 $s = 15 \mu\text{m}$ 时, 在较高电流下观察到功率略趋饱和。当 $s = 10 \mu\text{m}$ 时, 这种趋势变得更为显著。因为在给定注入电流的辐射复合密度随条宽降低而增加^[7]。

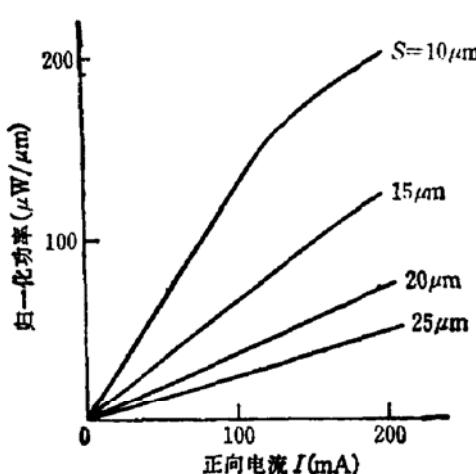


图 3 归一化功率与正向电流的关系

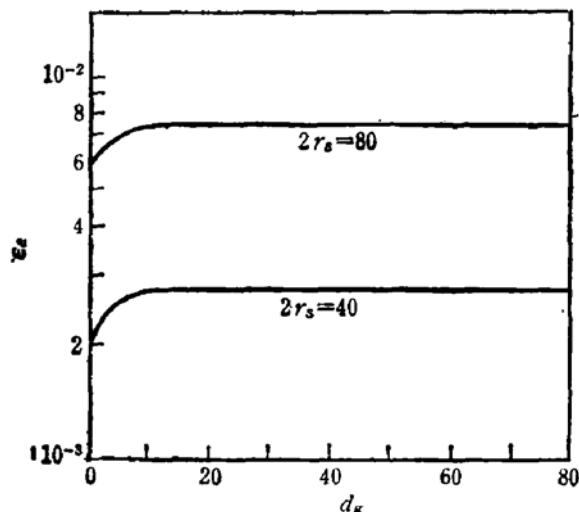


图 4 一定 r_s 下 d_s 对 ϵ_e 的影响

$$L = 150 \mu\text{m} \quad \alpha_3 L = 0.15 \quad S = 20 \mu\text{m} \quad \alpha_1 L = 3 \quad d = 0.3 \mu\text{m}$$

2. 结构参数对 LED 光提取效率的影响

应用式(4), 我们首先计算了两组 r_s 下 $d_s - \frac{d_2}{d_3}$ 对 LED 功率提取效率 ϵ_e 的影响, 结果示于图 4, 由图可见, d_s 最佳值为 10, 当 d_s 小于 10 时, ϵ_e 随 d_s 的减小急剧下降; 而当 d_s 大于 10 时, ϵ_e 基本保持不变, 说明 d_s 的继续改变不再对 ϵ_e 的提高产生贡献, 故不必单纯追求光波导层的厚度, 这样还会增加工艺制造困难和造成器件串联电阻的增加。选择光波导层厚度与有源层厚度之比为 10 左右最为合适。由(4)式也可以计算出腔长 L 和有源层厚度 d_3 与 LED 光提取效率 ϵ_e 的影响, 示于图 5。由图可见, 随着 L 的增加, ϵ_e 不断下降, 这是因为 α_3 一定后 L 增加的结果, 使 $\alpha_3 \cdot L$ 之积不断变大, 当 L 小时, 虽对光提取效率有利, 但芯片的装架很困难。从图 5 还可见, ϵ_e 不随有源层厚度 d_3 的改变而增

加。这从(1)式的定义完全可以预料,因为 P_z 与 P_c 中 d_3 可以相约,所以 s_c 与 d_3 无关,而只与 d_2 有关。这就意味着过分减小有源层厚度并不可取,虽然降低 d_3 可导致响应加快,

带宽增加但也会增加制造工艺的困难。一般选取 $d_3 = 0.3 \mu\text{m}$, $d_2 \approx 10$ 最为合理。

3. 频响特性

LED 的频响可表示为^[8]

$$R(\omega) = \frac{P(\omega)}{P(\omega=0)} = \frac{1}{(1+\omega^2\tau^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (10)$$

当光功率降至其低频值一半,即 $P(\omega) = \frac{1}{2} P(\omega=0)$ 时对 3 dB LED 的光带宽,我们得 $\omega_{\text{带}} = \sqrt{3}\tau^{-1}$ 。 (11)

由此式可知,短的少数载流子寿命是好的高频性能的关键因素,在给定电流下,较窄条宽较短腔长和薄有源层将产生较高的注入载流子密度,所以辐射寿命缩短。因此具有较小几何结构的 LED 更容易达到高速响应。在 100 mA, LED 的截止频率 $f_c = 60-100 \text{ MHz}$ (相当于 100-170 MHz 的光带宽)。

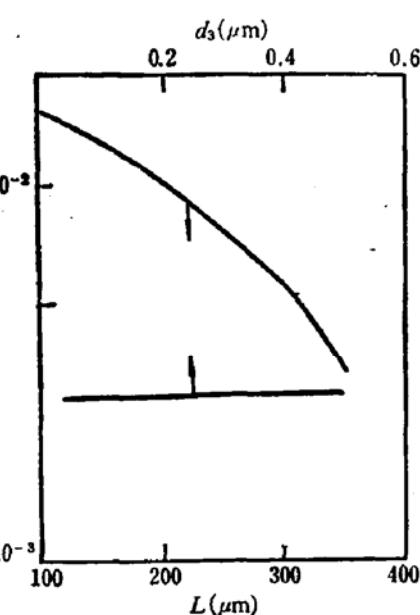


图 5 腔长和有源层厚度对 s_c 的影响

4. 近场和远场图像

我们利用选行扫描红外电视装置^[9]观测了不同条宽 LED 的近场。发现在电流大于 20 mA 时近场图样不大变化,如图 6 所示。在平行于结平面方向的光束发散角(θ_{\parallel})约为 120°,而在垂直于结平面方向由于双异质结构的部分波导效应光束的发散角(θ_{\perp})为 60~90°。随电流的增加发散角似有降低的趋势。特别是对于具有 10 μm 宽度的窄条器件,当电流从 50 mA 增加至 200 mA 时,其发散角 θ_{\parallel} , θ_{\perp} 均约降低 10°,这可由后面的耦合实验来证明。

5. 耦合效率(η_c)

LED 和具有 $NA = 0.2$, 芯径为 50 μm 端面烧球的梯度光纤的耦合由三维微动台来实现。随条宽从 25 μm 减小至 10 μm, η_c 从 9.7% 逐渐增加至 13%, 在 100 mA 和 200 mA, 10 μm 条宽 LED 的耦合效率变化较大,这可能归因于窄条 LED 发散角的降低。对某些二极管,在 100 mA 耦合入光纤的光功率 P_f 约 $60 \mu\text{W} \sim 200 \mu\text{W}$, 最高达 $220 \mu\text{W}$ 。

6. 条宽 S 对侧向光强半峰值的全宽 $W_{\frac{1}{2}}$ 的影响

应用式(7)-(9),可计算出注入电流 I_i 对 $W_{\frac{1}{2}}$ 的影响,结果示于图 7,计算结果与我们用红外选行扫描电视的实测结果十分相符。由图可见, I_i 大于 10 mA 直至 100-200 mA (实际应用范围),光强分布的宽度是稳定的,并不因为电流的增加而增加。这就给我们在一定注入电流下,比较条宽对 $W_{\frac{1}{2}}$ 的影响创造了条件。图 8 给出了一定注入电流下,归一化的 $W_{\frac{1}{2}}/S$ 与 S 的关系。很明显,当条宽 $S < 15 \mu\text{m}$ 时,更多的光可在条宽外边分布,使光的发散更厉害。因此无限地降低条宽是不足取的。综合权衡,选择 20 μm 左右为宜。并由图可见,注入电流越大,归一化的 $W_{\frac{1}{2}}/S$ 值在较小的 S 下就趋于 1,表明光

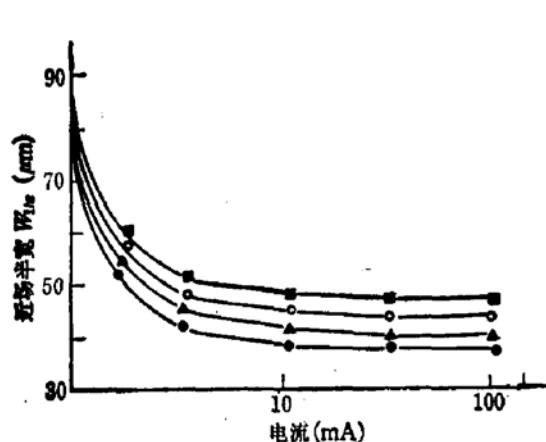
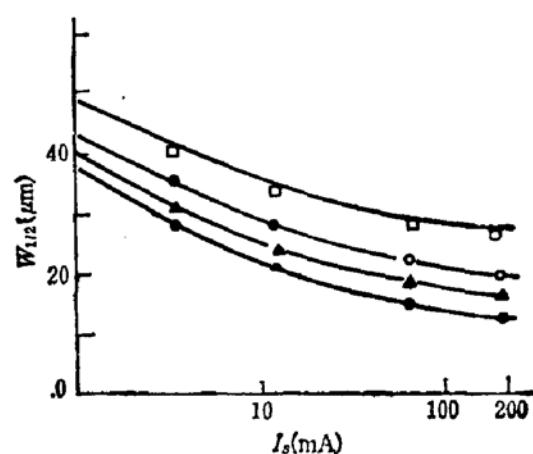


图 6 近场半宽与电流的关系

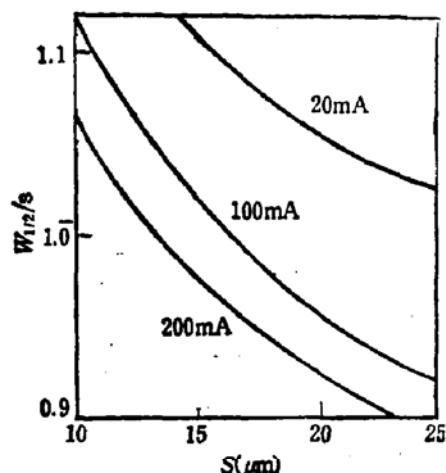
——计算值
 ● $S = 10\mu\text{m}$
 ▲ $S = 15\mu\text{m}$
 ○ $S = 20\mu\text{m}$
 □ $S = 25\mu\text{m}$

实验值

图 7 注入电流 I_s 对 $W_{1/2}$ 的影响

——计算值
 ● $S = 10\mu\text{m}$
 ▲ $S = 15\mu\text{m}$
 ○ $S = 20\mu\text{m}$
 □ $S = 25\mu\text{m}$

实验值

图 8 归一化 $W_{1/2}/S$ 与条宽的关系

的限制可在较窄的条宽下, 达到较理想的状态。这对缩小器件的光斑, 提高光纤耦合功率是有益的。

四、研究结果在 LED 制造中的应用

根据上述讨论, 我们可通过 LED 几何结构的最佳化重复制备出性能优良的 GaAlAs/GaAs 快速发光管, 其主要技术参数为:

正向电流 $I_f = 100\text{mA}$,	正向压降 $V_f < 1.7\text{V}$,
峰值波长 $\lambda_p = 820 \sim 860\text{nm}$,	光谱半宽 $\Delta\lambda \leq 40\text{nm}$,
尾纤输出 $P_f = 60 \sim 200\mu\text{W}$,	截止频率 $f_c = 60 \sim 100\text{MHz}$,
高温寿命(外推) $> 10^5\text{ h}$,	由老化成品率(平均) 60%.

此外, 器件 $I-P$ 线性好, 反向击穿特性好, 串联电阻 R_s 小, 温度特性好, 也是这种 LED 的

优点。经-40℃到+55℃高低温循环三次(交换时间不大于3分钟),在55℃高温老化以及规定标准的振动,冲击等例行试验后,器件无一损坏,性能稳定,重复、一致、可靠。作为一个应用结果,利用我们研制的ELED在市内光缆通信局间中继试验段上进行了三次群光缆通信的现场试验,传输6~7公里,取得了满意结果。

ELED在系统中实际运行一定时间后,通话正常,无误码。系统接收灵敏度-47 dBm(BERS 10^{-9}),富裕度8 dB。图9为LED传输系统的接收机输出眼图。表明这种器件可用作三次群光缆通信系统的光源,具有较大的技术价值。这种LED已用于脉冲频率调制(PFM)的彩电光纤传输系统,表明LED频响较宽,出光功率稳定。除此,ELED还可在雷电冲击电压和高精度光纤损耗的测量,光纤温度传感器和精密测距等方面找到广泛的应用。

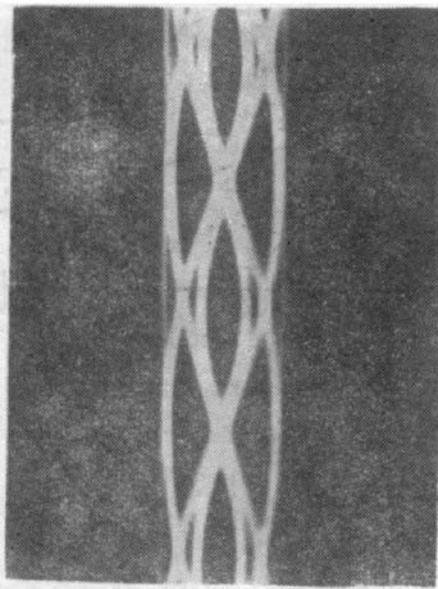


图9 经6 km 光缆传输接收放大后的眼图

五、结 论

研究了边发光管的几何结构,对其各种性能的影响,实验结果和理论计算相符。通过对结构参数的合理设计,可复制得高质量的LED。由于结构完善,这种LED的驱动电流小,串联电阻小,正向压降低,光提取效率高,输出功率大,功率-电流(*P-I*)线性呈现良好,响应快,带宽大,近场图样好,光束发散小,发射波长稳定,光谱半宽较小,温度系数小,性能一致重复,稳定可靠寿命长。适用于三次群数字传输系统,彩电及快速模拟传输系统。除此,在光纤传感器,光纤测量以及精密测距等方面也有广泛应用价值。

本文的工作得到上海通信设备厂黎景福、谢绍连,谢荣琪及于凌春等同志的支持和技术帮助,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] D. Botex and M. Ettenberg, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-26, 1230(1979).
- [2] Y. X. Pang, H. Z. Pan, Z. Q. Cheng, P. N. Shen, G. Q. Wu and Z. Y. Xiao, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-30, 348(1983).
- [3] Y. Horikoshi, Y. Takanashi and G. Iwane, *Jpn. J. of Appl. Phys.*, 15, 485(1976).
- [4] Y. Seki, *Jpn. J. of Appl. Phys.*, 15, 327(1976).
- [5] H. Yonezu, I. Sukuma, K. Kobagashi, T. Kamajima, M. Vano, and Y. Nannichi, *Jpn. J. of Appl. Phys.*, 12, 1585(1973).
- [6] J. A. Borsuk, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-30, 296(1983).
- [7] 逢永秀、潘耀珍、龚连根、吴冠群、王德宁、吴陈周,《发光与显示》, 6, 1(1985).
- [8] H. Kressel and J. K. Butler, *Semiconductor Lasers and Heterojunction LED's*, 488, New York, Academic Press (1977).
- [9] He Liang Chang, Wu Guanqun, Shen Pengnian and Xiao Zongyao, *J. China Institute of Communications*, 8, 88(1982).

Stripe Geometry and Performance of High Speed GaAlAs/GaAs Edge-Emitting LED with Asymmetrical Waveguide

Pang Yongxiu, Wang Dening, Gong Liangen, Wu Guanqun, Pan Huizhen

(Shanghai Institute of Metallurgy, Academia Sinica)

and Wu Chenzhen

(Shanghai Telecommunication Equipment Factory, Postal and Telecommunication Ministry)

Abstract

The effect of stripe geometry on the performances of high speed GaAlAs/GaAs edge-emitting LED with asymmetrical waveguide is described. By calculating the efficiency ε_e of the light extraction and of the light output power from the LED, we have discussed the relationships concerning the structure parameters of "5-layer-structure" LED with asymmetrical waveguide. We have also calculated lateral current spreading and optical field distribution of the LED under different stripe widths. The results calculated are in good agreement with those of our experiments. By reasonable option, edge-emitting LEDs with good performances are obtained at a driving current of 100mA. The output power at the end of a fiber pigtail (core diameter of fiber = 50 μm and numerical aperture $N_A = 0.2$) is 60—200 μW (max. 220 μW) and the cut-frequency greater than 60 MHz (3dB) (max. 100 MHz). The LED's are good source devices for optical fiber communication system with data rate of 34Mb/s and for high speed analog transmitting system.