

光纤通信用 GaAs—GaAlAs DH LED 的高频调制特性

詹素真

(重庆光电研究所)

提要: 分析了器件的两种高频调制特性,给出了测量结果——数据和曲线。讨论了器件在不同信号调制下的 $P-I$ 、 $V-I$ 曲线线性范围和调制带宽,由此确定器件的合适工作点。

High frequency modulation characteristics of GaAs—GaAlAs DH LEDs for optical fiber communication

Zhan Suzhen

(Chongqing Opto-electronics Research Institute)

Abstract: The high frequency modulation characteristics of GaAs—GaAlAs DH LEDs are analyzed and the results (data and curves) presented. Also discussed are the linear range and modulation bandwidth for $P-I$, $V-I$ curves as the devices are modulated by various signals, and the optimum operation point of the device can thus be determined.

一、理论依据

半导体 DH LED 的调制带宽主要受异质结处的空间电荷区电容 C 、微分电阻 R 构成的时间常数和注入到有源区中的载流子寿命所限制。注入电流 I 足够大时,可以忽略电容等引起的寄生效应^[4]。在恒定的调制电流下,器件的输出光功率随调制电流角频率 ω 的变化如下^[1]:

$$P(\omega) = \frac{P_0}{[1 + (\omega\tau)^2]^{1/2}} \quad (1)$$

式中 P_0 是在同样幅度直流电流下的输出光

功率, τ 是器件的注入载流子寿命,且有:

$$\tau = \tau_r + \tau_{nr} \quad (2)$$

式中, τ_r 是辐射复合寿命, τ_{nr} 是非辐射复合寿命。对 DH LED 而言,由于损耗在非辐射复合过程中的载流子很少,故可认为:

$$\tau \approx \tau_r \quad (3)$$

调制带宽一般被定义为探测器检测的电功率的一半时的频率^[2,4],根据(1)式得:

$$4f = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (4)$$

另一种定义是输出光功率下降至零调制频率的一半时的频率^[2],则依(1)式得:

收稿日期: 1983年4月5日。

$$\Delta f' = \frac{\sqrt{3}}{2\pi\tau} \quad (4)'$$

在 P 型有源区中, τ 可表示为^[2]:

$$\tau = \frac{-BP_0qd + \sqrt{(BP_0qd)^2 + 4BJqd}}{2BJ} \quad (5)$$

式中 B 是复合常数, P_0 是有源区空穴浓度, d 是有源层厚度, J 是注入电流密度。

应该指出, 上述公式的推导都是在忽略了光子寿命 τ_p 的情况下进行的。因为在 GaAs 半导体发光器件中 τ_p 值很小, $\tau/\tau_p = 10^3 \sim 10^5$, 在实际计算中可忽略 τ_p 的影响。

对于一定结构参数的器件, 在某一环境温度下, 其最大耗散功率和最大注入电流之间的关系是^[3]:

$$I_{\max,t} = \frac{P_{\max,t}}{V_{F,\max,t_{25}}} \quad (6)$$

式中 t 是环境温度, t_{25} 是室温 25°C 下, $V_{F,\max,t_{25}}$ 表示 25°C 下器件最大正向工作电压。

一个实际的 DH LED, 其电流-电压关系特性可表示为:

$$I = I_{s0} \{ \exp[e(V - IR_s)/akT] - 1 \} \quad (7)$$

式中 I_{s0} 是饱和电流, $1 \leq a \leq 2$, V 是器件两端的电压。

根据自发发射的光-电流关系得出^[4]: 低电流注入下,

$$P_o^2 \propto I \quad (8)$$

高电流注入下,

$$P_o \propto I \quad (9)$$

二、实 验

1. 样品

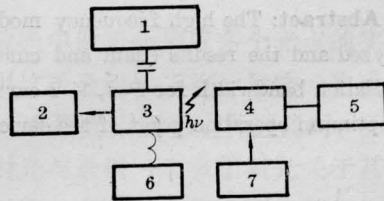
实验中所用器件为 Burrus 表面发射型, 晶片用液相外延方法制成, 具有四层结构。其制作方法是: 在 n 型 GaAs 衬底上依次液相外延生长 $n\text{-Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ 限制层 (Te, $5 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{18}$ 厘米⁻³, $10 \sim 12$ 微米), $P\text{-GaAs}$ 有源层 (Si, Ge, $1 \sim 2 \times 10^{18}$ 厘米⁻³, $0.6 \sim 2$ 微米), $P\text{-Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ 限制层 (Ge, 1×10^{17}

厘米⁻³ $\sim 1 \times 10^{18}$ 厘米⁻³, 2 微米), $n\text{-GaAs}$ 顶层 (Te, $2 \sim 6 \times 10^{18}$ 厘米⁻³, $1 \sim 2$ 微米)。利用 $p\text{-}n$ 结隔离 Zn 扩散沟通技术, 形成 $\phi 50$ 微米的电流注入区 (面积 $S = 1.96 \times 10^{-5}$ 厘米²), 通过光刻腐蚀法在衬底上形成出光洞。器件管芯 P 面朝下热焊在镀 Au 的无氧铜管座上, n 侧用金丝焊接形成电接触。与光纤耦合的器件带有 Si PIN 光电二极管监视输出 (即把 LED 与 PIN 封装在一个管壳中), 使用方便。

用不同外延片制作 25 只样品, 通过 $P\text{-}I$ 、 $V\text{-}I$ 曲线及近场、光谱等特性测量和寿命实验筛选, 选用其中 10 支做测量用。器件在 $I_b = 100$ 毫安下输出光功率 $1 \sim 4$ 毫瓦, 峰值波长 $\lambda_p = 8300 \sim 8900 \text{ \AA}$, 谱线半宽 $\Delta\lambda = 400 \sim 550 \text{ \AA}$, 截止频率 $f_c \geq 15$ 兆赫, 使用寿命 $> 1 \times 10^4$ 小时。与 $\phi 50$ 微米阶跃光纤耦合后, 尾纤光输出功率 ≥ 100 微瓦, 最高达 300 微瓦左右。

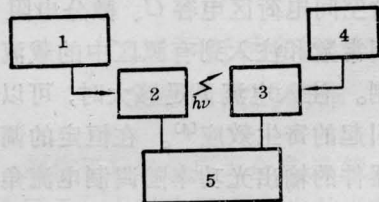
2. 系统

DH LED 的高频调制特性, 可采用二种



(a) 正弦调制法测试系统示意图

1—XFG-7 高频信号发生器; 2—SBM-14 示波器; 3—LED 测试盒; 4—接收盒 (SiPIN); 5—DW2 宽带电压表; 6—直流偏置电源; 7—直流稳压源



(b) 脉冲调制法测试系统示意图

1—MFD-1A 毫微秒信号发生器; 2—LED 测试盒; 3—SIRAPD; 4—直流偏置电源; 5—双通道 500 兆赫宽带示波器

图 1

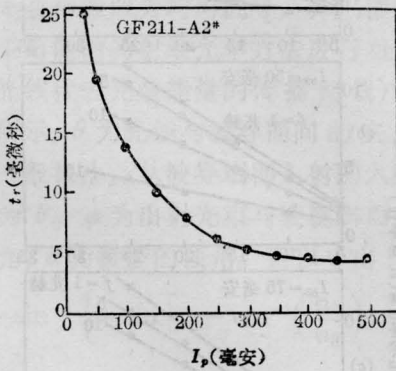
方法测量,一是方波脉冲调制法,二是正弦波调制法。前者不需预先加直流偏置,后者的正弦信号叠加在预偏的直流信号上。图1(a)为正弦调制法测试系统示意图,图1(b)为脉冲调制法测试系统示意图。测试时需十分注意整个回路的阻抗匹配。

三、结 果

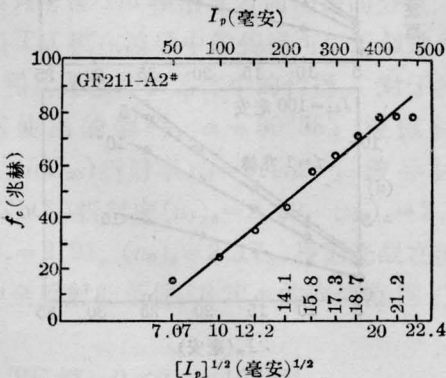
1. 脉冲调制法

图2(a)、(b)为样品 GF211-A2# 在脉冲调制下测到的 t_r-I_p 和 f_c-I_p 关系曲线。从图可见,在 50~500 毫安的脉冲峰值电流下, t_r 随 I_p 增加而近指数衰减,而 f_c 与 I_p 的 $\frac{1}{2}$ 次方成比例增加。图2(b)中的 f_c 值是依式^[5]:

$$f_c = \frac{0.35}{t_r} \quad (10)$$



(a) t_r-I_p 关系曲线



(b) 根据公式(10)换算的 f_c-I_p 关系曲线

图 2

换算的,它与正弦调制下测到的 f_c 值有些差别。

实验中,注入电流脉冲频率为 300 赫,脉宽 100 毫微秒, I_p 最大峰值取 500 毫安。图 3 示出了 GF211-A20# 器件的 P_p-I_p 关系曲线。从图可见,在 50~500 毫安电流范围内, P_p-I_p 基本为线性关系。

2. 正弦电流调制法

本节叙述不同 I_b 和 I_m 对器件截止频率 f_c 和调制输出光功率 P_m 的影响。给出了各种关系曲线。

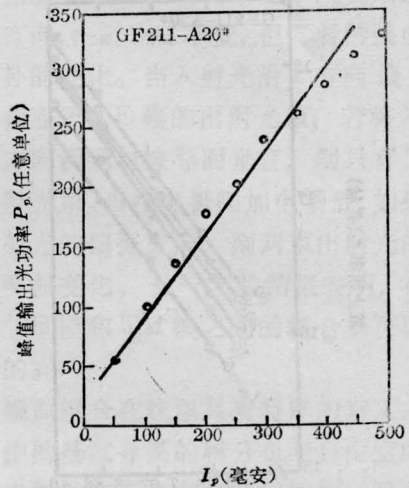


图 3 GF211-A20# P_p-I_p 关系曲线

(1) 调制频率 f 和输出光功率 P_m 的关系

图 4 为样管 GF2114# 的 $f-P_m$ 关系曲线。很明显, P_m 随 f 的增加而逐渐下降。定

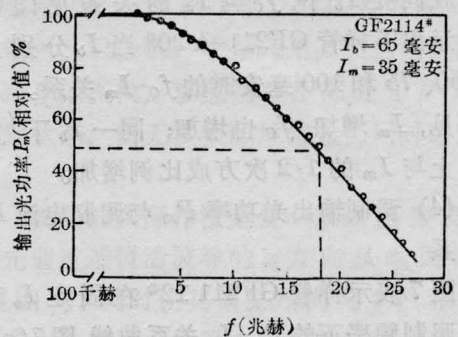


图 4 GF2114# $f-P_m$ 关系曲线

义 P_m 下降至最大值一半时所对应的 f 为器件的截止频率 f_c 。图中 4# 器件的 $f_c=18$ 兆赫, 工作点为 $I_b=65$ 毫安, $I_m=30$ 毫安。

(2) 截止频率 f_c 与直流偏置电流 I_b 的关系

图 5 为样管 GF211-A20# 在恒定调制电流 I_m 下的 f_c-I_b 关系曲线。图中的六条曲线分别对应于 I_m 为 5、10、15、20、25、30 毫安。很明显, 在同一 I_m 下, f_c 随 I_b 的 1/2 次方近线性增加。

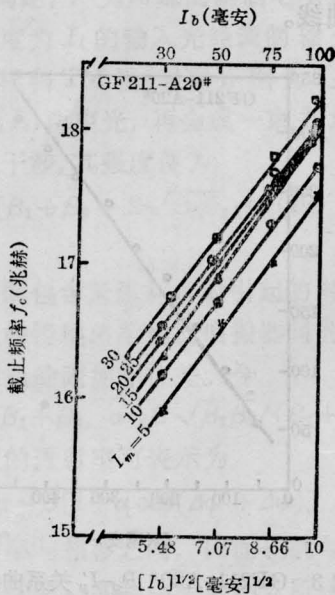


图 5 不同 I_m 下样管 GF211-A20# 的 f_c-I_b 关系

(3) 截止频率 f_c 与交流调制电流 I_m 的关系

在固定 I_b 下, f_c 与 I_m 的关系见图 6。图中示出了样管 GF211-A20# 当 I_b 分别为 30、50、75 和 100 毫安时的 f_c-I_m 关系。从图可见, I_m 增加, f_c 也增加; 同一 I_b 下, f_c 基本上与 I_m 的 1/2 次方成比例增加。

(4) 调制输出光功率 P_m 与调制电流 I_m 的关系

图 7 表示样管 GF211 12# 在固定 I_b 和规定调制频率下的 P_m-I_m 关系曲线。图 7(a)、(b)、(c)、(d) 分别对应于 $I_b=30$ 、50、75 和

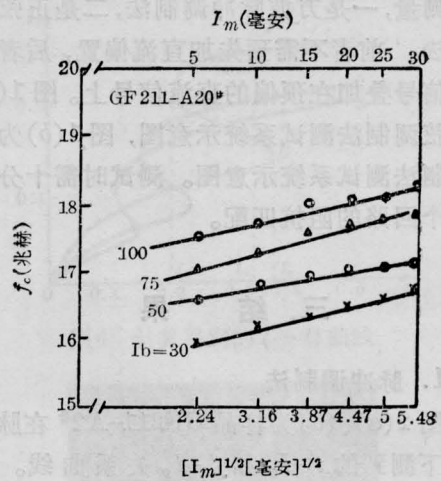


图 6 不同 I_b 下, GF211-A20# 的 f_c-I_m 关系曲线

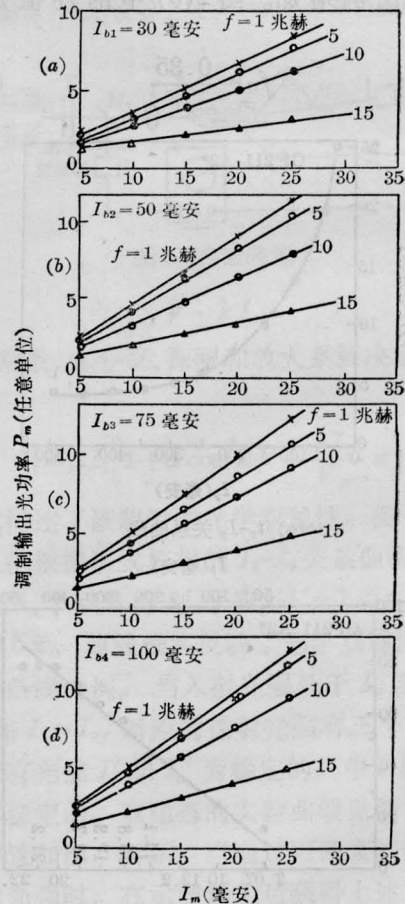


图 7 样管 GF211 12# 在不同 I_b 下和不同频率下的 P_m-I_m 关系

100 毫安。调制频率分别取 1、5、10、15 兆赫。

从图可见,在某一频率下,当 I_b 固定时, P_m 与 I_m 有良好线性关系;在同一 I_b 和恒定 I_m 下, P_m 随调制频率的增加而减少。

(5) 调制输出光功率和直流偏置电流 I_b 的关系

在恒定的 I_m 和规定的调制频率下, P_m 与 I_b 关系如图 8(a)、(b)、(c)、(d)、(e),它分别对应于 $I_m=5、10、15、20、25$ 毫安。

大多数器件,在同一频率下,当 I_m 恒定时, P_m 随 I_b 增加而增加,到某一 I_b 值后 P_m 基本保持不变。一部分 $P-I$ 线性较差的器件,在 $I_b=30\sim 70$ 毫安范围内, P_m 随 I_b

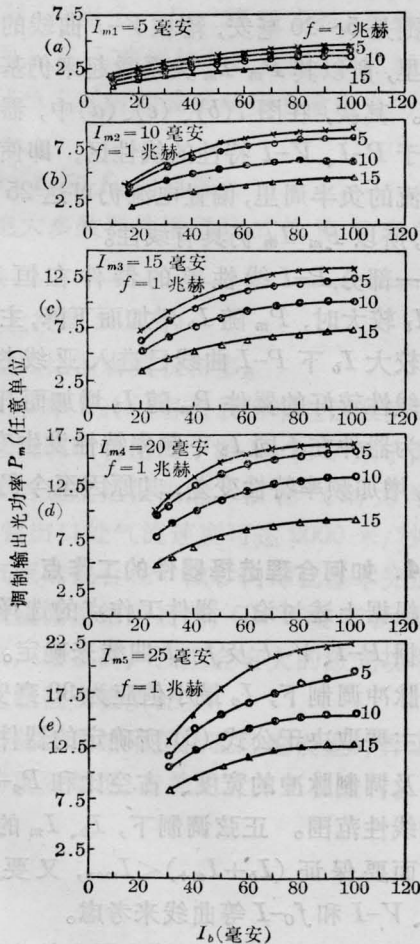


图 8 样管 GF211 12# 在不同 I_m 和不同 f 下的 P_m-I_b 关系

增加而增加;而在 $I_b=70\sim 100$ 毫安范围内, P_m 则随 I_b 增加而略为下降,个别 $P-I$ 线性较好的器件也有类似情况。

从图 8 还可看到,在较大的调制度下 ($M>90\%$), P_m 值较低,而在合适的调制度下, P_m 随 I_b 增加比较成比例增加。

四、讨 论

1. $P-I、V-I$ 特性的线性区

根据公式(6),对一定结构参数和设计参数(如材料、层厚、掺杂浓度、面积、管壳封装结构)的器件来说,在一定的环境温度下,其最大正向注入电流受最大耗散功率所限制。对我们研制的器件,根据计算^[3],在 25°C 下最大正向直流注入电流至少为 200 毫安。

从公式(7)可见,小电流注入下, $I \propto \exp(eV/akT)$,这时外加电压主要降落在 $p-n$ 结上,当注入电流增加到使外加电压 $V \geq E_g/e$ 时, $I-V$ 关系基本为线性,其变化率 $\frac{\Delta V}{\Delta I} = R_s$ 为一常数。器件的 $P-I、V-I$ 曲线见图 9。

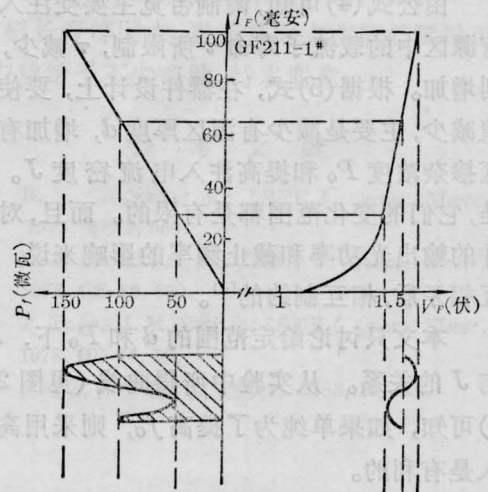


图 9 器件的 $P-I、V-I$ 特性和正弦调制工作点的选择

对近 100 支用不同外延片制作的器件进行实测结果得出:在 $I_b=5\sim 100$ 毫安范围

内,器件的输出光功率-电流曲线具有良好线性。

所有器件,当 $I_b < 40$ 毫安时, $V-I$ 关系为非线性,只有在 $I_b \geq 40$ 毫安(对应的 $V < 1.55$ 伏)以后, $V-I$ 关系呈现良好线性。大多数器件在 $I_b \geq 25$ 毫安下(对应的 $V < 1.5$ 伏), $V-I$ 曲线则有较好的线性。 $V-I$ 曲线的斜率 $\frac{\Delta V}{\Delta I} = R_s$, 其值通常为 $2 \sim 3$ 欧姆, R_s 也称器件的动态电阻。

因此,器件的工作电流范围首先决定于 $P-I$ 、 $V-I$ 特性的线性区和器件的最大耗散功率。根据上述讨论,脉冲调制下 I_p 最小值应为 30 毫安左右,其最大值决定于公式(6)和注入脉冲的宽度、占空比和 P_p-I_p 曲线的线性区。正弦调制下, $(I_b + I_m)$ 的值最好选在 $30 \sim 100$ 毫安范围内。

2. 调制带宽与注入载流子寿命

由图 2、4、5、6 等可见,器件的调制带宽与注入电流的 $1/2$ 次方基本上成线性关系,而上升时间则随注入电流的增加近指数衰减。这与按(4)、(5)两式所计算的结果相符。

由公式(4)可知,调制带宽主要受注入到有源区中的载流子寿命 τ 所限制, τ 减少, Δf 则增加。根据(5)式,在器件设计上,要使 τ 值减少,主要是减少有源区厚度 d , 增加有源区掺杂浓度 P_0 和提高注入电流密度 J 。但是,它们的变化范围都是有限的。而且,对器件的输出光功率和截止频率的影响来说,是互相矛盾,相互制约的^[4]。

本文只讨论给定范围的 d 和 P_0 下, Δf 与 J 的关系。从实验中所得到曲线(见图 2~8)可知,如果单纯为了提高 f_c , 则采用高注入是有利的。

3. 调制输出光功率和注入电流的关系

从图 3、7 和 8 可见,调制输出光功率和注入电流在一定范围内有近似线性关系。特别是图 3 和 7 中,这种线性关系比较明显。

图 8 中,由于 $\frac{I_m}{I_b}$ 的变化范围大,特别是当 I_b 较小, I_m 较大(如 M 接近 100%—— $M = \frac{I_m}{I_b} \times 100\%$)时,器件的 $P-I$ 、 $V-I$ 特性已完全进入非线性工作区。在这种情况下,其频率特性也会随之变化,所以表现出低 I_b 下 P_m 下降厉害,而高 I_b 下,器件输出光功率接近饱和,整个 P_m-I_b 曲线的非线性较明显。

图 7 中 P_m-I_m 的线性关系可这样解释。首先,因为 $\frac{I_m}{I_b}$ 变化范围较小,因而器件频率特性变化不大;即使在最大的 $\frac{I_m}{I_b}$ 下——图 7(a)中,在正弦电流的负半周,偏置电流的变化范围是 $5 \sim 20$ 毫安,落在 $V-I$ 曲线的非线性区里,所以其 P_m-I_m 关系看起来仍基本为线性。其次,在图 7(b)、(c)、(d)中,器件都工作于 $P-I$ 、 $V-I$ 特性的线性区,即使在正弦电流的负半周里,偏置电流仍可达 25 毫安以上,所以 P_m-I_m 仍具有线性。

一部分 $P-I$ 线性差的器件在恒定 I_m 下, I_b 较大时, P_m 随 I_b 增加而下降,主要原因是较大 I_b 下 $P-I$ 曲线已进入亚线性区;个别线性较好的器件 P_m 随 I_b 增加而下降,是因为器件在不同 I_b 下频率特性发生变化,即 I_b 增加频率特性变差,其原因至今仍未明了。

4. 如何合理选择器件的工作点

根据上述讨论,器件工作点的选择主要应依据 $P-I$ 、 $V-I$ 及 f_c-I 曲线来确定。

脉冲调制下, I_p 最小值应为 30 毫安,最大值主要取决于公式(6)所确定的器件耗散功率及调制脉冲的宽度、占空比和 P_p-I_p 曲线的线性范围。正弦调制下, I_b 、 I_m 的选取一方面要保证 $(I_b + I_m) < I_{max}$, 又要结合 $P-I$ 、 $V-I$ 和 f_c-I 等曲线来考虑。

根据上述实验结果,结合图 9 的分析,对我们研制生产的 $\phi 50$ 微米 DH LED 得出:

正弦调制下, 取 $I_b=62.5\sim 70$ 毫安, $I_m=37.5\sim 30$ 毫安较为合适。具体计算如下: 从图 9 中, 得 $P-I$ 线性范围为 $I=5\sim 100$ 毫安, $V-I$ 线性范围为 $I=25\sim 100$ 毫安, 综合考虑取 $I=25\sim 100$ 毫安, 根据下式

$$\begin{cases} I_b + \frac{1}{2} I_{m(p\sim p)} = 100 \text{ 毫安} \\ I_b - \frac{1}{2} I_{m(p\sim p)} = 25\sim 40 \text{ 毫安} \end{cases}$$

得: $I_b=62.5\sim 70$ 毫安, $I_m=37.5\sim 30$ 毫安。在这个工作点下, 即使在正弦电流的负半周, 器件截止频率 f_c 仍可达 15 兆赫。

如增加 I_b , 减少 I_m , 则从图 9 可见, 器件工作的动态范围将减少, 由此造成工作状态不稳定; 反之, 减少 I_b , 增加 I_m , 即提高调制度 M , 则当 $I_b - I_m < 25$ 毫安时, 器件工作点将进入 $V-I$ 曲线的非线性区, 由此将造成在正弦负半周时的波形畸变的输出光功率明显下降。

5. t_r 和 f_c 的换算

绝大多数器件用(10)式换算出来的 f_c

值与小信号正弦调制下测到的 f_c 值有些差别。例如 GF211-A 20# $I_p=50$ 毫安时, $t_r=20$ 毫微秒, 即 $f_c=17.5$ 兆赫; $I_p=100$ 毫安时, $t_r=14$ 毫微秒, 即 $f_c=25$ 兆赫。在正弦调制中, 取 $I_b=50$ 毫安, $I_m=25$ 毫安时, $f_c=17.4$ 兆赫; $I_b=100$ 毫安, $I_m=25$ 毫安时, $f_c=19$ 兆赫。后者与脉冲调制法相差 6 兆赫, 这可能是高幅度脉冲注入使耗尽的载流子很快填满, 从而使器件的辐射复合寿命 τ_r 缩短之故。

参 考 文 献

- [1] Henry Kressel, J. K. Butler; "Semiconductor Lasers and Heterojunction LEDES", 1977, p. 488, p. 71.
- [2] Kenji Ikeda; IEEE Transactions on Electron Devices, 1977, ED-24, NU7, p. 1001.
- [3] Alan Chappell; "Optoelectronics, Theory and Practice", 1976, p. 217~128.
- [4] Tien Pei Lee et al.; IEEE J. Quant. Electr., 1978, QE-14, No. 3, 150~158.
- [5] [美]无线电公司编, 史斯, 伍琐译校;《电光学手册》, 国防工业出版社出版, 1978年, p. 139.

(上接第 282 页)

其增益区比前者要长得多。

图 3 中 $P_2(J)$ 各谱线的增益区长约 1 厘米, 这说明喷管出口下游 H_2 和 F 原子两股气流混合速度是很快的。根据气动力学计算, 喷管出口处气流速度可达 2000 米/秒, 可见, 气流的混合在 5 微秒内即已基本完成。

增益测量结果表明, CL-9 喷管的混合速度快, 增益高, 预期会有大的激光功率输出。这已被实验所证实。

增益测量结果是检验理论模型计算正确与否的重要数据, 有关的计算正在进行。

参加工作的还有逢景科、闵祥德、李明盛、桓长青等同志。崔铁基同志在信号测量工作中曾给予不少帮助, 特表谢意。

参 考 文 献

- [1] R. A. Chodzko et al.; IEEE J. Quant. Electr., 1973, QE-9, 550.
- [2] R. A. Chodzko et al.; IEEE J. Quant. Electr., 1976, QE-12, 660.
- [3] T. Yauo, H. M. Botitch; IEEE J. Quant. Electr., 1978, QE-14, 12.
- [4] 黄瑞平, 孙以珠;《中国激光》, 1983, 10, 250.