

DH 激光器电光延迟时间与注入脉冲电流的关系及其测量

王守武 赵礼庆 张存善 邓生贵

(中国科学院半导体研究所)

1981年2月16日收到

提 要

本文推导了DH激光器电光延迟时间与注入脉冲电流幅度和上升前沿的关系表达式,并用我们设计的测试系统,对本所研制的质子轰击条形DH激光器进行了测试。对于90-15#器件,在1.5倍脉冲阈值电流注入下,测得其电光延迟时间 t_d 为4ns,载流子自发复合寿命 τ_{sp} 为3.2ns;对加有直流偏置的情况也进行了测试;还列出了另外几个器件的测试结果。从画出的测试曲线来看,与理论曲线符合得都比较好。

引 言

当DH激光器用于脉冲调制时,如果想要提高脉冲调制速率,首先碰到的一个问题就是DH激光器的电光延迟效应,即输出光脉冲的起点与注入电脉冲的起点之间存在一定的电光延迟时间 t_d 。由于这一效应的存在,不仅会使光脉冲变窄,而且,当脉冲电流宽度小于电光延迟时间 t_d 时,甚至还会有可能使脉冲调制完全失效。因此,研究和测定DH激光器的电光延迟时间 t_d 与注入脉冲电流的关系,对于我们深入了解器件内部载流子输运过程,设法提高脉冲调制速率,确定其载流子自发复合寿命等方面,都是很有实际意义的。

原 理 与 方 法

DH激光器电光延迟效应的物理本质是由于注入载流子到建立起粒子数反转分布要有一个时间过程,这一过程与器件的载流子自发复合寿命 τ_{sp} 有关,可由载流子的速率方程求出 t_d 与 τ_{sp} 的关系式。

脉冲电流作用期间载流子的速率方程可表示为^[1]:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{J}{ed} - \frac{n}{\tau_{sp}} - G(n)S, \quad (1)$$

式中 n 为电子浓度; J 为注入电流密度; τ_{sp} 为载流子自发复合寿命; S 为光子密度; $G(n)$ 为受激发射增益函数; e 为电子电荷; d 为有源层厚度。

在求解 t_d 的表达式时,前人大都是设注入脉冲电流为一足够宽的理想矩形脉冲,即脉冲上升前沿 $t_r=0$,这样就会有 $J=J_p$ 。然后考虑到注入脉冲电流开始至激射以前的这

段时间内的光子密度很小,故公式(1)中 $G(n)S$ 项可忽略,他们得到的 t_d 表达式为^[2,3]:

$$t_d = \tau_{sp} \ln \left(\frac{J_p}{J_p - J_{pth}} \right). \quad (2)$$

式中 J_{pth} 为脉冲阈值电流密度.

对于加有直流偏置情况, t_d 则为:

$$t_d = \tau_{sp} \ln \left(\frac{J_p}{J_p - J_{pth} + J_{DC}} \right). \quad (3)$$

式中 J_{DC} 为直流预偏置密度.

在具体测量中,实际 t_r 并不为零,而通常还是比较大的. 为了精确分析 t_d , 则 t_r 的影响不能被忽略. 当考虑到注入脉冲电流的上升前沿 t_r 时, 我们可以将速率方程分别在 $0 \leq t \leq t_r$ 和 $t_r \leq t \leq t_d$ 两个区间求解,可以得到 $t_r \approx 0$ 时的 t_d 表达式,即:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{J_p}{ed} \frac{t}{t_r} - \frac{n}{\tau_{sp}} - \frac{J_{DC}}{ed}, \quad \begin{cases} 0 \leq t \leq t_r, \\ t_r < t_d. \end{cases} \quad (4)$$

利用边界条件, $t = 0$ 时, $n = n_{DC} = \frac{J_{DC}\tau_{sp}}{ed}$, 可求得其解为:

$$n = \frac{J_p \tau_{sp}}{ed t_r} \left(e^{-\frac{t}{\tau_{sp}}} - 1 \right) - \frac{J_p \tau_{sp}}{ed t_r} t + \frac{\tau_{sp}}{ed} J_{DC},$$

$t = t_r$ 时, 则有:

$$\begin{aligned} n_{tr} &= \frac{J_p \tau_{sp}}{ed t_r} \left(e^{-\frac{t_r}{\tau_{sp}}} - 1 \right) + \frac{\tau_{sp}}{ed} (J_{DC} + J_p), \\ \frac{dn}{dt} &= \frac{J_p + J_{DC}}{ed} - \frac{n}{\tau_{sp}}, \quad t_r \leq t \leq t_d. \end{aligned} \quad (5)$$

由(5)式积分可得到:

$$n = A e^{-\frac{t}{\tau_{sp}}} + \frac{\tau_{sp}}{ed} (J_p + J_{DC}),$$

由于 $t = t_r$ 时, (4) (5) 两式之解相连接, 从而可定出 A 值为:

$$A = \frac{J_p \tau_{sp}}{ed t_r} \left(1 - e^{-\frac{t_r}{\tau_{sp}}} \right),$$

则

$$n = \frac{J_p \tau_{sp}}{ed t_r} \left(1 - e^{-\frac{t_r}{\tau_{sp}}} \right) + \frac{\tau_{sp}}{ed} (J_p + J_{DC}).$$

利用阈值条件, $t = t_d$ 时, $n = n_{pth} = \frac{J_{pth}\tau_{sp}}{ed}$ ^[4], 则可求得 t_d 的表达式为:

$$t_d = \tau_{sp} \ln \left[\frac{J_p + \frac{\tau_{sp}}{t_r} \left(e^{-\frac{t_r}{\tau_{sp}}} - 1 \right)}{J_p - J_{pth} + J_{DC}} \right]. \quad (6)$$

本测试系统所用的主要设备有: 低重复频率, 上升前沿为 800ps、脉宽为 15ns 的脉冲电

流发生器;备有直流预偏置的激光发射装置;激光接收装置,其中硅 APD 探测器的响应速度约为 200ps;发、收之间设置的光学系统;SAS-5009B 取样示波器; x - y 函数记录仪等。

测试原理框图如图 1 所示。

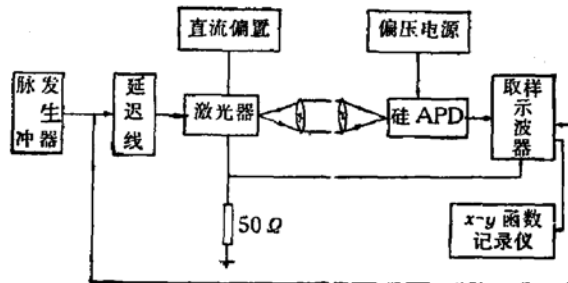


图 1 测试电光延迟时间 t_d 的框图

测量结果

本实验重点对 90-15[#] DH 激光器进行了测试,该激光器为质子轰击条形双异质结

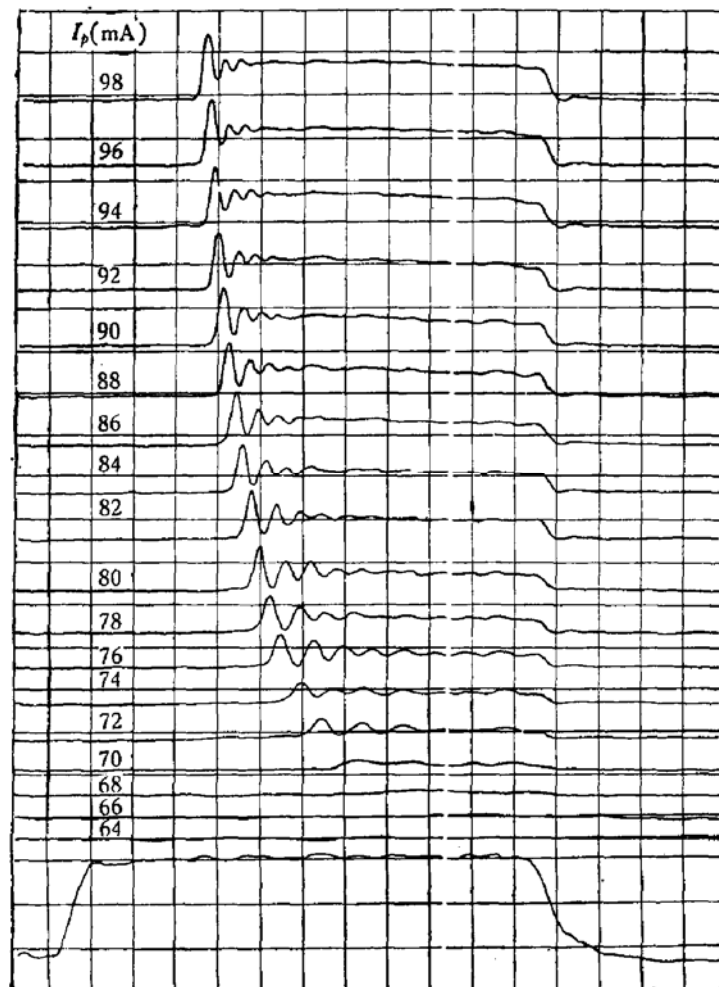


图 2 DH 激光器的电光延迟脉冲波形
横坐标 1.33ns/cm, 纵坐标 5V/cm

构,其条宽约 $12\mu\text{m}$,腔长约 $200\mu\text{m}$,直流阈值电流约 72mA .

图 2 是用 $x-y$ 函数记录仪画出来的电光延迟脉冲波形. 测试时未加直流偏置,即 $I_{DC} = 0$. 图中最下边的一条为注入脉冲电流波形,上面的是不同注入脉冲电流下相应的光脉冲波形,电流脉冲波形与光脉冲波形的相对位置是用脉冲后沿对准来确定的. 脉冲电流波形的上升前沿 $t_r \approx 800\text{ps}$.

图 3 是根据图 2 所测数据绘制的 $t_d \sim I_p$ 关系曲线. 从图中可以看出, DH 激光器的电光延迟时间 t_d 随着注入脉冲电流幅度增加而缩短,这与公式 (6) 是相符的.

根据图 2 所测得的 t_d 值和公式 (6), 还可得出 $t_d \sim I_p/(I_p - I_{pth})$ 的关系曲线, 如图 4 所示. 图中实线为根据公式 (6) 所作的理论曲线簇. 为了要与实际测得的 t_d 相比较, 必须先确定 I_{pth} . 但实验测定 I_{pth} 值是有一定困难的, 因为 I_{pth} 随器件的温度而变化, 故不能用直流方法测定 I_{pth} . 因此, I_{pth} 可以由图 4 的实验数据与理论曲线符合得最好来决定. 这样我们得出该器件的 I_{pth} 为 64.6mA 、载流子自发复合寿命 τ_{sp} 为 3.2ns .

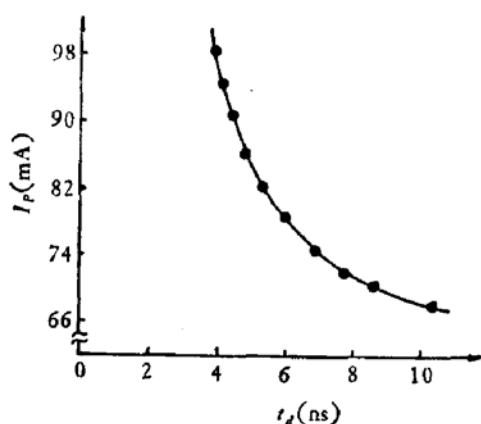


图 3 t_d-I_p 关系曲线
 $I_{pth} = 64.6\text{mA}$, 室温 $T = 287\text{K}$

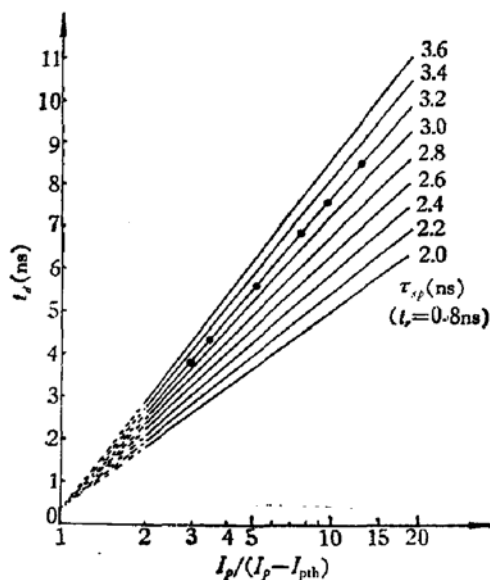


图 4 $t_d(I_p, \tau_{sp}, t_r)$ 曲线
 $I_{pth} = 64\text{mA}$, $I_{DC} = 0$, 室温 $T = 287\text{K}$

当给该器件加上 30mA 直流偏置时, 所测结果如图 5 所示. 从图中可看出, 所测器件的 τ_{sp} 变小, 这是由于加上直流偏置后, 器件的结温升高, 脉冲阈值电流 I_{pth} 增大所致.

另外, 加上直流偏置后, 其电光延迟时间 t_d 也相应变短, 现将 $I_{DC} = 0$ 和 $I_{DC} = 30\text{mA}$ 时测得的结果分别列于表 1 中加以比较.

表 1

I/I_{pth}	$I_{DC} = 0, I = I_p, I_{pth} = 64.6\text{mA}$ $t_d(\text{ns})$	$I_{DC} = 30\text{mA}, I = I_p + I_{DC}, I_{pth} = 69\text{mA}$ $t_d(\text{ns})$
1.1	8.4	5.7
1.3	4.9	3.6
1.5	4.0	2.7

对于不同炉号制做的质子轰击条形 DH 激光器, 虽然尽量做到各项工艺重复, 但做到完全一致是很困难的. 不过从我们测得的结果来看, 某些参数的离散性还不是很大的, 就测得的 τ_{sp} 而言, 大都在 2—3ns 范围内, 现将 6-93-4[#]、19-93-37[#]、9-3-16[#] 三个器件的测试结果如图 6 所示.

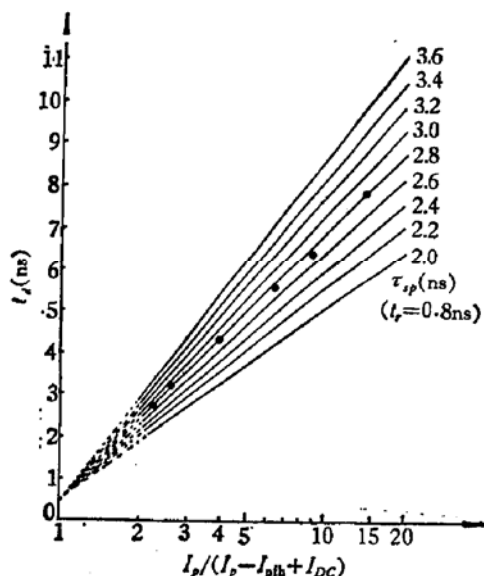


图 5 $t_d(I_p, \tau_{sp}, t_r)$ 曲线
 $J_{pth} = 69\text{mA}$, $J_{DC} = 30\text{mA}$, 室温 $T = 287\text{K}$

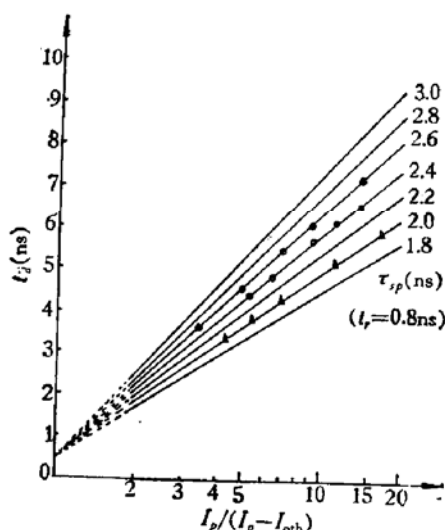


图 6 $t_d(I_p, \tau_{sp}, t_r)$ 曲线
—▲— 6-93-4[#] 器件, $\tau_{sp} \approx 2.6\text{ns}$
—○— 9-93-37[#] 器件, $\tau_{sp} \approx 2.4\text{ns}$
—●— 9-3-16[#] 器件, $\tau_{sp} \approx 2.6\text{ns}$

讨 论

1. t_d 的近似表达式

从公式 (6) 不难看出, 如果 $t_r \ll \tau_{sp}$, 就能导出 t_d 的近似表达式为:

$$t_d \approx \tau_{sp} \ln \left(\frac{J_p}{J_p - J_{pth} + J_{DC}} \right) + \frac{t_r}{2}. \quad (7)$$

这说明在 $t_r \ll \tau_{sp}$ 的情况下, 注入脉冲电流上升前沿对电光延迟时间的影响可简单地表达为 $\frac{t_r}{2}$. 另外, 从图 4, 图 5, 图 6 都可以看到这一点.

2. $J_{pth}(\infty)$ 值及其与 $J_{pth}(\tau)$ 值的关系

本文前面所用的 J_{pth} 值, 实际上是指无限宽的阶跃脉冲电流注入下的阈值电流密度, 常记作 $J_{pth}(\infty)$. 实际上, 无限大的电光延迟时间是不可能测量的, 而往往由于注入脉冲电流起伏和器件本身热起伏特性, 所能观察到的最大电光延迟时间大都在 4 倍 τ_{sp} 左右, 此时的 J_{pth} 值略大于 $J_{pth}(\infty)$, 因此, 对于 J_{pth} 值, 可由 $t_d(I_p, \tau_{sp}, t_r)$ 曲线图中实验数据与理论曲线符合得最好来决定.

反过来讲,如果我们在测量 DH 激光器的电光延迟特性时,用一定脉宽 τ 的注入脉冲电流来测量激光器在这种脉宽情况下的阈值电流密度 $J_{pth}(\tau)$, 并且设 $J_{pth}(\tau) = J_p + J_{DC}$, 则应该得到 $J_{pth}(\tau) > J_{pth}(\infty)$. 由公式 (6) 可得:

$$\tau = \tau_{sp} \ln \frac{(J_{pth}(\tau) - J_{DC}) \frac{\tau_{sp}}{t_r} (e^{\frac{t_r}{\tau_{sp}}} - 1)}{J_{pth}(\tau) - J_{pth}(\infty)},$$

即

$$J_{pth}(\tau) = \frac{J_{pth}(\infty) - J_{DC} \frac{\tau_{sp}}{t_r} (e^{\frac{t_r}{\tau_{sp}}} - 1) e^{-\frac{\tau}{\tau_{sp}}}}{1 - \frac{\tau_{sp}}{t_r} (e^{\frac{t_r}{\tau_{sp}}} - 1) e^{-\frac{\tau}{\tau_{sp}}}}.$$

在 $t_r \ll \tau_{sp}$ 条件下,可近似为:

$$J_{pth}(\tau) \simeq \frac{J_{pth}(\infty) - J_{DC} \left(1 + \frac{t_r}{2\tau_{sp}}\right) e^{-\frac{\tau}{\tau_{sp}}}}{1 - \left(1 + \frac{t_r}{2\tau_{sp}}\right) e^{-\frac{\tau}{\tau_{sp}}}}. \quad (8)$$

图 7 示出了 90-15# 器件不同注入电流脉宽测得的 $I_{pth}(\tau)$ 值和根据公式 (8) 所做的

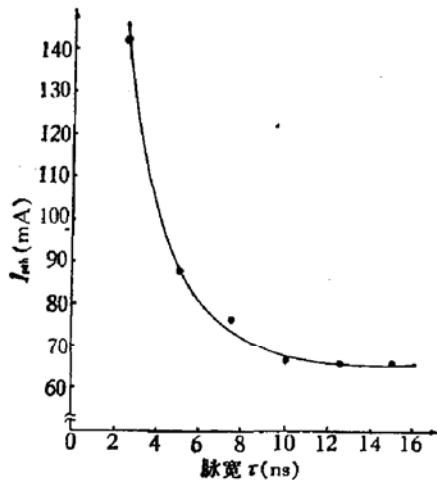


图 7 $I_{pth} \sim \tau$ 关系曲线——理论曲线, · 测试值, 室温 $T = 287K$

理论曲线。从图 7 可以看出, 测试值和理论曲线符合得还是比较好的。当注入脉冲电流宽度 $\tau < 4\tau_{sp}$ 时, $I_{pth}(\tau)$ 随着 τ 变小而迅速增高, 当 $\tau = \tau_{sp}$ 时, 其 $I_{pth}(\tau_{sp})$ 值比 $I_{pth}(\infty)$ 值大约增大 0.55 倍。

3. 关于时基问题

根据电光延迟时间 t_d 的定义, 应该是指电脉冲和光脉冲起始点间的间隔。但是, 由于这两个脉冲是用取样示波器的两路分别测出的, 而两路都具有自身的延迟特性, 如果两路延迟时间不一样, 或不固定, 就会产生系统测试误差, 要想使两路延迟特性做到完全一致, 是比较困难的, 这需

要附设连续可变延迟器。为了便于测试, 我们在处理数据时, 假设了电脉冲和光脉冲的后沿是同时发生的, 实际上也基本如此, 故以后沿为时基标准, 就能很容易推算出两路脉冲起始点的间隔。实践证明, 这种方法是简便可行的。

此工作得到了王启明同志的支持, 测试器件全部由本所七室二组提供, 另外, 还得到其他兄弟组和室的支持, 在此特表示感谢。

参 考 文 献

- [1] T. L. Paoli, J. E. Ripper, *Proc. IEEE*, 58, p. 1457 (1970).
- [2] J. C. Dymont, J. E. Ripper, *J. Appl. Phys.*, 43, p. 452 (1972).
- [3] 王启明, 杜宝勋, 半导体通讯, No. 6, p. 90 (1979).
- [4] G. Arnold, P. Ruaser, *J. Appl. Phys.*, 14, p. 255 (1977).

The Dependence of the Electro-Optical Delay Time on Injection Pulse Current in DH Lasers and Their Measurements

Wang Shouwu, Zhao Liqing, Zhang Cunshan and Deng Shenggui

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica)

Abstract

The expression for the dependence of the electro-optical delay time on the injection pulse current level and the front edge rise time was derived. The measurement of a stripe type DH lasers made by proton bombardment has been carried out by using the measurement system designed by ourselves. For device 90—15*, at the current level 1.5 times the pulse threshold current ($I = 1.5 I_{th}$) the electro-optical delay time t_d was measured to be 4ns, and the spontaneous recombination lifetime τ_{sp} be 3.2 ns. Some measurements were carried out with a D.C. bias. For several additional devices more results have been obtained. It can be seen that the measured results agree well with the theoretical ones.